

**UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE**  
**Přírodovědecká fakulta**  
Katedra aplikované geoinformatiky a kartografie



**VYUŽITÍ DAT LETECKÉHO LASEROVÉHO  
SKENOVÁNÍ V LESNÍCH POROSTECH**  
**APPLICATION OF AIRBORNE LASER SCANNING IN FORESTS**

Bakalářská práce

Oldřiška Sedláčková

srpen 2010

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Markéta Potůčková, Ph.D.

### **Prohlášení kvalifikační práce**

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracovala samostatně a že jsem všechny použité prameny řádně citovala.

Jsem si vědoma toho, že případné použití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu v Praze je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

Svoluji k zapůjčení této práce pro studijní účely a souhlasím s tím, aby byla řádně vedena v evidenci vypůjčovatelů.

V Kralovicích dne 23. srpna 2010

.....  
Oldřiška Sedláčková

## **Poděkování**

Na tomto místě bych ráda poděkovala vedoucí bakalářské práce Ing. Markétě Potůčkové, Ph.D. za věnovaný čas, cenné rady a připomínky. Dále pak bych chtěla poděkovat konzultantovi Mgr. Petru Dušánkovi ze Zeměměřického úřadu za podání informací o projektu leteckého laserového skenování ČÚZK a RNDr. Jakubu Lysákovi za poskytnutí a předpřípravu datových podkladů. V neposlední řadě děkuji rodině za podporu v průběhu celého studia.

## OBSAH

<b>Přehled použitých zkratk.....</b>	<b>6</b>
<b>Seznam obrázků, tabulek a grafů .....</b>	<b>7</b>
<b>1. Úvod .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Úvod do problematiky.....</b>	<b>10</b>
2.1 Stručná historie LLS systémů a jejich využití pro mapování lesů .....	10
2.2 Vlastnosti laserového paprsku .....	11
2.2.1 Základní vlastnosti laserového paprsku a laserových skenerů .....	11
2.2.2 Odrazivost laserového paprsku.....	13
2.2.3 Interakce laserového paprsku s korunami stromů.....	16
2.3 Charakteristiky lesního porostu .....	17
2.3.1 Výška stromu.....	17
2.3.2 Poloha stromu .....	19
2.3.3 Druh dřeviny .....	20
2.3.4 Vykreslení koruny .....	20
2.4 Vytváření digitálního modelu reliéfu, metody filtrace.....	21
2.4.1 Definice DMR a DMP.....	21
2.4.2 Tvorba digitálního modelu reliéfu .....	22
2.4.3 Filtrační metody .....	22
2.4.4 Mezinárodní spolupráce a vzájemná výměna poznatků .....	24
2.6 Projekt leteckého laserového skenování ČR.....	26
<b>3. Data a metodika zpracování .....</b>	<b>29</b>
3.1 Data .....	29
3.2 Charakteristika zájmových území .....	30
3.2.1 Lokalita Dobruška .....	31
3.2.2 Lokalita Sobotka.....	33
3.3 Metodika zpracování dat.....	34
3.3.1 Průchodnost laserového paprsku korunami stromů .....	35
3.3.2 Střední výška stromů v zájmových územích .....	35
<b>4. Výsledky .....</b>	<b>37</b>
4.1 Průchodnost laserového paprsku korunami stromů .....	37
4.2 Střední výška stromů.....	39
<b>5. Diskuze.....</b>	<b>42</b>
<b>6. Závěr .....</b>	<b>46</b>
<b>Seznam zdrojů a informací .....</b>	<b>47</b>

## PŘEHLED POUŽITÝCH ZKRATEK

<b>ALS</b>	<b>A</b> irborne <b>L</b> aser <b>S</b> canning (letecké laserové skenování)
<b>Bpv</b>	<b>B</b> alt <b>p</b> o <b>v</b> yrovnání
<b>CHM</b>	<b>C</b> anopy <b>H</b> eight <b>M</b> odel (výškový model korun)
<b>ČÚZK</b>	Český úřad zeměměřický a katastrální
<b>dbh</b>	<b>D</b> iameter at <b>B</b> reast <b>H</b> eight (výčetní tloušťka kmene)
<b>DGPS</b>	<b>D</b> iferenční <b>G</b> PS (GPS viz níže)
<b>DMP</b>	<b>D</b> igitální <b>m</b> odel <b>p</b> ovrchu
<b>DMR</b>	<b>D</b> igitální <b>m</b> odel <b>r</b> eliéfu
<b>FR</b>	<b>F</b> irst <b>R</b> eturns (první odrazy)
<b>GPS</b>	<b>G</b> lobal <b>P</b> ositioning <b>S</b> ystem
<b>INS</b>	<b>I</b> nerciální <b>n</b> avigační <b>s</b> ystém
<b>LiDAR</b>	<b>L</b> ight <b>D</b> etection <b>A</b> nd <b>R</b> anging (přístroj nebo technologie k detekci objektů měřením vzdáleností)
<b>LLS</b>	<b>L</b> etecké <b>l</b> aserové <b>s</b> kenování
<b>LR</b>	<b>L</b> ast <b>R</b> eturns (poslední odrazy)
<b>PRF</b>	<b>P</b> ulse <b>R</b> epetition <b>F</b> requency (frekvence vysílání pulsu)
<b>S-JTSK</b>	<b>S</b> ystém <b>j</b> ednotné <b>t</b> rigonometrické <b>s</b> ítě <b>k</b> atastrální
<b>TIN</b>	<b>T</b> riangulated <b>I</b> rrregular <b>N</b> etwork (nepravidelná trojúhelníková síť)
<b>ÚHÚL</b>	Ústav pro <b>h</b> ospodářskou <b>ú</b> pravu <b>l</b> esů
<b>VÚGTK</b>	<b>V</b> ýzkumný <b>ú</b> stav <b>g</b> eodetický, <b>t</b> opografický a <b>k</b> artografický
<b>WGS-84</b>	<b>W</b> orld <b>G</b> eodetic <b>S</b> ystem <b>1984</b> (světový geodetický systém 1984)

## SEZNAM OBRÁZKŮ, TABULEK A GRAFŮ

Obr. 1	Při leteckém laserovém skenování jsou určovány prostorové polární souřadnice ....	12
Obr. 2	V letecké fotogrammetrii je důležité, aby jeden bod byl zaznamenán alespoň ze dvou pozic letadla v prostoru .....	12
Tab. 1	Reflektivita vybraných materiálů .....	13
Obr. 3	Diagram odrazu od difuzního povrchu .....	14
Obr. 4	Diagram odrazu od zrcadlového povrchu .....	14
Obr. 5	Diagram odrazu od kombinovaného povrchu .....	14
Obr. 6	Diagram odrazu od rýhovaného povrchu .....	15
Graf 1	Spektrální projev vegetace .....	15
Obr. 7	Rozdíl mezi digitálním modelem reliéfu (vlevo) a digitálním modelem povrchu (vpravo) .....	21
Graf 2	Vliv sklonitosti terénu na přesnost DMR .....	26
Obr. 8	Pásma leteckého laserového skenování území ČR .....	27
Tab. 2	Současné výškopisné modely České republiky .....	28
Tab. 3	Převýšení v zájmových územích .....	31
Obr. 9	Zájmová území v lokalitě Dobruška .....	32
Obr. 10	Zájmová území v lokalitě Sobotka .....	34
Tab. 4	Míra prostupnosti laserového paprsku lesním porostem .....	37
Tab. 5	Podíl bodů reprezentujících reliéf v zájmových územích .....	38
Tab. 6	Porovnání šesti metod výpočtu střední výšky, Dobruška .....	40
Tab. 7	Porovnání šesti metod výpočtu střední výšky, Sobotka .....	40

## 1. ÚVOD

Letecké laserové skenování je poměrně novou technologií na poli dálkového průzkumu Země. Jedná se o metodu sběru dat, která využívá aktivní laserový paprsek k vytváření mračna bodů o přesných prostorových souřadnicích, a to na základě odrazů tohoto paprsku na výrazných překážkách. V prostředí lesních porostů se jedná primárně o odrazy od vrcholů korun, od větví z nižších partií stromů a od reliéfu. Laserový paprsek má schopnost pronikat vegetací, z jednoho vyslaného pulsu může být částečnými odrazy od překážek zaznamenáno v laserovém senzoru několik navracených odrazů.

Inventarizace lesních porostů se v současnosti běžně neobejde bez fotogrammetrického měření, interpretace leteckých snímků a terénních šetření. Tyto způsoby jsou ale poměrně časově náročné, pracné i finančně nákladné. Obvyklé výdaje se pohybují asi kolem 15-20 EUR/ha, z čehož 50-60 % tvoří finance na samotné pořízení a zaznamenání dat (Hyypä et al., 2001). Letecké laserové skenování může v tomto ohledu ušetřit výdaje, lidskou sílu i čas. Se svou výslednou datovou přesností a časově méně náročným zpracováním pořízených dat bude do budoucna jistě v tomto oboru vhodnou alternativou. Již nyní je zavedenou metodou pro pořizování digitálních modelů reliéfu v zalesněných územích, jak popisuje Hyypä et al. (2005).

Motivací k sepsání této práce je fakt, že letecké laserové skenování je v České republice novou, neprobádanou oblastí, kterou je třeba odborné veřejnosti zpřístupnit a představit. Jde o technologii, která by mohla být alternativou současné fotogrammetrie a v případě tvorby DMR zalesněných území ji dokonce do budoucna nahradit. Z dat LLS lze vytvářet výškově přesné digitální modely reliéfu a povrchu, které mají využití nejen v oblasti lesního hospodářství, ale i při tvorbě hydrologických modelů, 3D modelů městské zástavby, vyhodnocování průběhu silnic, železnic, elektrických vedení i např. při archeologických průzkumech.

Cílem práce je provést analýzu dat leteckého laserového skenování pořízených v rámci pilotního projektu tvorby nového výškopisného modelu České republiky ve zkušebních lokalitách Dobruška a Sobotka. Data byla pořízena před začátkem vegetačního období. V rámci praktické části práce bude zjištěna prostupnost laserového paprsku jehličnatým, listnatým a smíšeným lesním porostem, dále bude zhodnocena vhodnost zvolené hustoty skenování

pro tvorbu digitálního modelu reliéfu a pro stanovení střední výšky stromů v zájmových územích.

Práce ve své řešeršní části představuje technologii leteckého laserového skenování, vlastnosti laserového paprsku, přibližuje, které charakteristiky lze z dat LLS o lesním porostu zjistit, a popisuje problematiku tvorby digitálních modelů reliéfu. Stručně je představen i projekt Zeměměřického úřadu probíhající v letech 2009-2015 a kladoucí si za cíl vytvořit nový výškopis území České republiky. V další části jsou popsána data a metodika použitá pro jejich zpracování, jsou charakterizována 3 zájmová území (oblast listnatého, jehličnatého a smíšeného lesa) z lokality Dobruška a 3 zájmová území z lokality Sobotka. Následuje komentář dosažených výsledků s příloženými tabulkovými výstupy. V diskusi je zhodnocena vhodnost použitých metod a srovnány zjištěné výsledky s teoretickými poznatky z literatury. A závěr nastiňuje možný směr vývoje leteckého laserového skenování.



## 2. ÚVOD DO PROBLEMATIKY

V úvodu do problematiky je v jednotlivých kapitolách představena technologie leteckého laserového skenování jako nová alternativa pro přesnější, více automatizovanou a časově méně náročnou inventarizaci lesních porostů. Je přiblížen proces tvorby digitálního modelu reliéfu z dat laserového skenování a popsán projekt tvorby nového výškopisu na území České republiky realizovaný v letech 2009-2015.

### 2.1 Stručná historie LLS systémů a jejich využití pro mapování lesů

Letecké laserové skenování (LLS), z anglického *airborne laser scanning (ALS)*, je technologií poměrně novou a stále se rozvíjející. Myšlenka vytváření a sestavování profilů lesních porostů<sup>1</sup> za použití přístrojů, které by překonávaly přesnost dat dosavadních lesnických map, byla představena již v roce 1939 (Hugershoff, 1939). Její uvedení do praxe nastalo ale až kolem roku 1980, kdy se tak ke slovu dostala technologie laserových jednotek a leteckého laserového skenování (Shan a Toth, 2009).

Koncepce použití leteckých laserových systémů pro skenování lesní biomasy a pro získávání informací o lesních porostech se vyvinula z oceánografického laserového skenování, které v té době bylo již zaběhlou technologií. Pomocí LiDARových systémů se původně monitorovaly oceány a mořské zalednění (Yu et al., 2004a).

Jak uvádí Dolanský (2004), pro rozvoj leteckého laserového skenování bylo důležité zaprvé uvedení družicového navigačního systému GPS do komerční praxe po roce 1980, zadruhé pokrok v inerciálních navigačních systémech (INS), metodě pro měření orientací, a zatřetí vyvinutí moderního laserového profileru v letech 1988-1993 na univerzitě ve Stuttgartu. Tak mohla být určena přesná prostorová souřadnice každého jednotlivého laserového odrazu.

Od té doby se data laserového skenování začala užívat pro odhadování výšky stromů, objemu dřevní hmoty a biomasy. Později se ukázalo, že parametry výškového profilu jsou lineárně závislé na hustotě porostu (vysoké lesy jsou řidší než porosty mladých tyčovin) a mohou tak být použity pro stanovení výšky stromů (Nelson et al., 1984).

---

<sup>1</sup> Pod termínem profil lesního porostu si můžeme představit např. výškové profily stromů.

Schreier et al. (1985) přišli se závěrem, že laserový paprsek o vlnové délce blízkého infračerveného záření je vyhovující pro skenování a následnou tvorbu terénních profilů a profilů (tvarů) korun stromů. Dále testovali i intenzitu laserového svazku vhodnou pro rozlišování vegetace a zastoupení dřevin.

O pár let později Nelson et al. (1988) předvedli, že výška stromů, objem dřevní hmoty a objem biomasy mohou být stanoveny s vyhovující přesností, a to za užití dat LLS zkombinovaných, porovnaných a zprůměrovaných s testovacími plochami změřenými v terénu.

S rozvojem leteckých snímků velkého rozlišení se otevřela cesta i pro určování druhů dřevin a vyhledávání a vykreslování jednotlivých stromů. A postupně se tak přešlo od charakteristik lesů na úrovni porostů (základní jednotka prostorového rozdělení lesa, obvykle o rozloze 0,5-3 ha, představovaná relativně homogenním zastoupením dřevin) k detailnějším charakteristikám na úrovni jednotlivých stromů (měření výšky stromu, průměru koruny, určování druhu dřevin apod.).

V současnosti se data leteckého laserového skenování dokonce využívají k monitorování pokácených a padlých stromů, monitorování růstu, změn v olistění nebo množství jehlic (Yu et al., 2004a).

Od roku 2002 se konají každoroční setkání a konference vědců v oblasti LiDARových technologií užívaných pro lesní hospodářství. Největší zkušenosti s leteckým laserovým skenováním lesních porostů mají Kanada, USA, Finsko, Norsko a Švédsko.

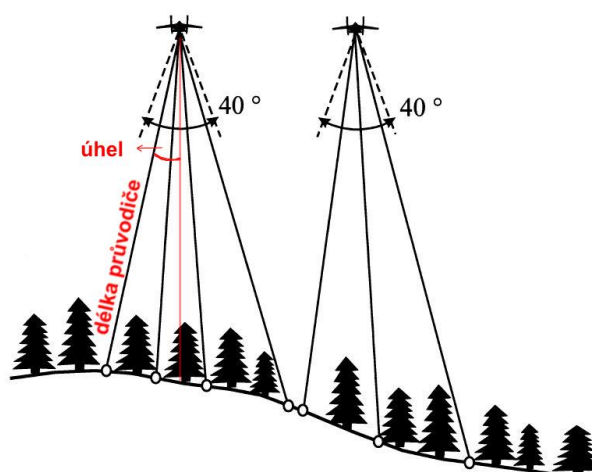
## 2.2 Vlastnosti laserového paprsku

Pro správné pochopení fungování leteckých laserových skenovacích systémů je vhodné se podrobněji seznámit s vlastnostmi a chováním laserového paprsku.

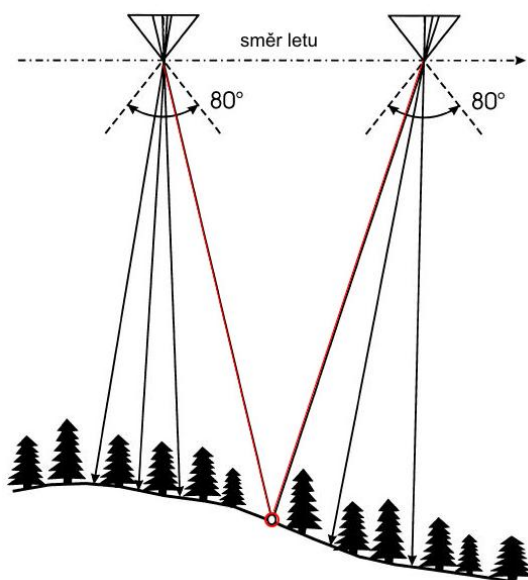
### 2.2.1 Základní vlastnosti laserového paprsku a laserových skenerů

Štroner a Pospíšil (2008, s. 17) definují laser z fyzikálního hlediska jako „kvantově elektronický zesilovač elektromagnetického záření nejčastěji v oblasti viditelného světelného spektra a přilehlých vlnových délek“. Laserový skenovací systém je „zdrojem velmi intenzivního monochromatického a časově i prostorově koherentního záření“ (Štroner a Pospíšil, 2008, s. 17).

Systém laserového skenování pracuje na principu určování prostorových polárních souřadnic, tzn. měří a zaznamenává se směr vyslaného paprsku (v podobě úhlu) a vzdálenost (délka průvodiče) k měřenému bodu na povrchu, jak ukazuje obrázek (Obr. 1). Znamená to tedy, že pro určení polohy a výšky bodu na povrchu stačí, když je tento bod zaměřen pouze jediným laserovým paprskem z jediné pozice letadla, resp. vrtulníku. Je to nesporná výhoda oproti letecké fotogrammetrii, kde je pro určení prostorové (3D) souřadnice bodu nutné, aby tento bod byl zaznamenán alespoň na dvou leteckých snímcích (viz Obr. 2), tzn. alespoň ze dvou pozic letadla v prostoru (Kraus a Pfeifer, 1998).



**Obr. 1** Při leteckém laserovém skenování jsou určovány prostorové polární souřadnice  
(zdroj: upraveno podle Kraus a Pfeifer, 1998, s. 194)



**Obr. 2** V letecké fotogrametrii je důležité, aby jeden bod byl zaznamenán alespoň ze dvou pozic  
letadla v prostoru (zdroj: upraveno podle Kraus a Pfeifer, 1998, s. 194)

V porovnání s fotogrammetrií a geodetickými metodami je letecké laserové skenování neselektivní technikou sběru dat. Geodetické metody měří pouze charakteristické body zájmu, jako jsou hrany, vrcholy apod. Fotogrammetrie zachycuje prostřednictvím záznamu obrazu celý objekt. Tedy přesněji s podrobností, která odpovídá velikosti pixelu na objektu. Jedná se tím pádem též o neselektivní způsob sběru dat, avšak s tím, že obraz poskytuje pro vyhodnocení spojitý vjem. Při skenování leteckou laserovou jednotkou jsou měřené body na povrchu rozmístěny neselektivně, v pravidelném úhlovém rastru a nejsou tak cíleně měřeny charakteristické body na objektech (Štroner a Pospíšil, 2008).

Technologie LLS je aktivní technologií, uskutečňuje se za užití aktivního paprsku (laserového, který není závislý na slunečním světle) a je v tom případě nezávislá i na denní době. Skenování je možné provádět 24 hodin denně (Kraus, 2007). Na rozdíl od leteckého nebo družicového optického snímkování, které jsou pasivními systémy a pouze registrují intenzitu odraženého elektromagnetického záření.

Každou laserovou jednotku lze charakterizovat hodnotou PRF. PRF (pulse repetition frequency) neboli frekvence, s jakou je laserový paprsek vysílán, za poslední roky výrazně stoupla, a to z 2 kHz (kolem roku 1994) na 200 kHz (rok 2007). To znamená, že v jedné vteřině je současnými laserovými jednotkami k zemi vysíláno 200 000 laserových paprsků (Kaartinen a Hyypä, 2008).

Hustota skenování se v současné době pohybuje až kolem 10 bodů / m<sup>2</sup> (Kaartinen a Hyypä, 2008).

Laserový paprsek může být při průchodu atmosférou výrazně zeslabován. A to vlivem nadměrného výskytu aerosolů (např. částice prachu i dalších antropogenních nečistot) a páry, které jsou všudypřítomnou součástí atmosféry. Každá částice obsažená ve vzduchu (molekuly plynů, ale i aerosoly) je pro procházející paprsek nehomogenitou, na jejímž povrchu dochází k rozptylu záření (Kolář et al., 1997). Intenzita vlny je tak zeslabována. Tím více, čím více se aerosolů a molekul vody v atmosféře vyskytuje. Nedoporučuje se skenování provádět za deště.

### 2.2.2 Odrazivost laserového paprsku

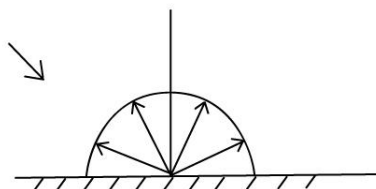
Důležitou fyzikální vlastností materiálů, na které vyslaný laserový paprsek dopadá, je jejich odrazivost (reflektivita). Významnou roli např. hraje při rozlišování, zda se jedná o listnatý či jehličnatý strom. Z tabulky (Tab. 1), která uvádí reflektivitu vybraných materiálů, je zřejmé, že jehličnany jsou charakteristické nižší reflektivitou než stromy listnaté. Reflektivita 100 % je podle Kašpara et al. (2003, s. 19) definována jako „ideální hodnota pro dokonalý difúzní odraz optického záření.“ Údaje v tabulce odpovídají vlnové délce elektromagnetického záření 900 nm.

**Tab. 1 Reflektivita vybraných materiálů** (zdroj: upraveno dle Wehr a Lohr, 1999, s. 74)

MATERIÁL	REFLEKTIVITA [%]
Bílý papír	do 100 %
Stavební dřevo (borovice, čistá, suchá)	94 %
Sníh	80-90 %
Bílé zdivo	85 %
Jíl, vápenec	do 75 %
Potištěný novinový papír	69 %
Listnaté stromy	typ. 60 %
Jehličnaté stromy	typ. 30 %
Plážový, pouštní písek	typ. 50 %
Hladký beton	24 %
Asfalt s oblázky	17 %
Láva	8 %
Černý neopren (syntetická guma)	5 %

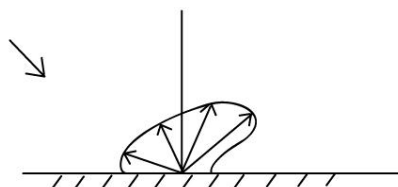
V praxi lze rozlišit 4 druhy povrchů podle tvaru odrazového diagramu (Kolář et al., 1997). Jedná se o povrch:

- *difuzní*, kde spektrální koeficient záře  $R_\lambda$  je po odrazu paprsku ve všech směrech konstantní (Obr. 3). Takovým odražečem je ve viditelném spektru např. písek nebo čerstvý sníh.



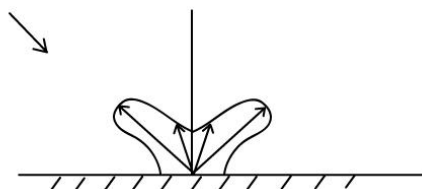
**Obr. 3 Diagram odrazu od difuzního povrchu** (zdroj: Kolář et al., 1997, s. 23)

- *zrcadlový*, charakteristický výrazným maximem spektrálního koeficientu záře  $R_\lambda$  ve směru odrazu pod úhlem dopadu (Obr. 4). Takovým povrchem je například vodní hladina, na které nedochází k odrazu paprsku do čidla nebo naopak dojde k vícenásobnému odrazu, který způsobí hrubé chyby ve vyhodnocení, a zaznamenaným datům jsou vygenerovány nesmyslné souřadnice (Kašpar et al., 2003). Podobně se chovají i skalní bloky, led, matně černé povrchy, tmavý asfalt. Dostatečně silného odrazu není dosaženo ani na mokřem terénu a vegetaci. Voda sama o sobě je málo reflektivním materiálem a její vzrůstající obsah ve vegetaci tak snižuje spektrální odrazivost zelených rostlin.



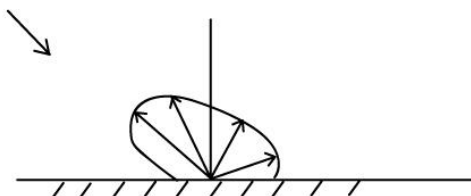
**Obr. 4 Diagram odrazu od zrcadlového povrchu** (zdroj: Kolář et al., 1997, s. 23)

- *kombinovaný*, představovaný např. zemědělskými plodinami, jakými jsou obilí, rýže, a charakteristický dvěma maximy spektrálního koeficientu záře  $R_\lambda$ , a to ve směru záření odraženého zpět a záření odraženého pod úhlem dopadu (Obr. 5).



**Obr. 5 Diagram odrazu od kombinovaného povrchu** (zdroj: Kolář et al., 1997, s. 23)

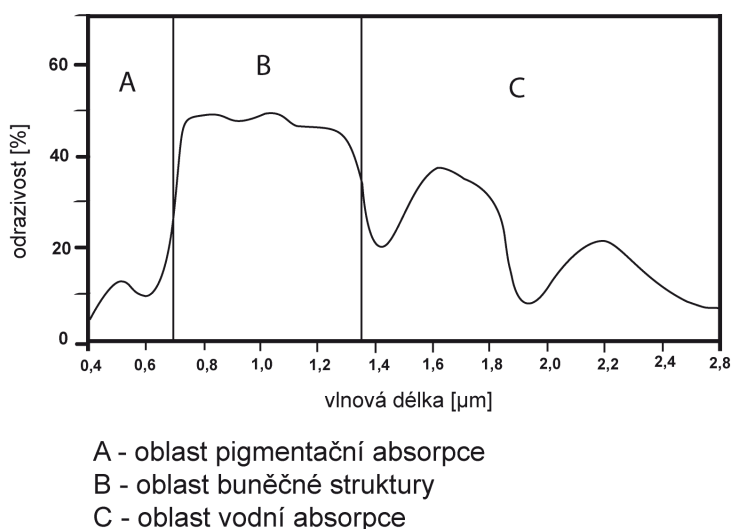
- *rýhovaný*, pro zpracovávané téma nejdůležitější, protože představuje povrch vegetačního krytu. Největší odrazivost, resp. maximum spektrálního koeficientu záře  $R_\lambda$ , se nachází ve směru záření odraženého zpět do čidla (tj. ve směru záření dopadajícího), jak lze vidět na obrázku (Obr. 6).



**Obr. 6 Diagram odrazu od rýhovaného povrchu** (zdroj: Kolář et al., 1997, s. 23)

Dobrovolný (2004) shrnuje poznatky o spektrální odrazivosti vegetace. Pro spektrální chování listů ve viditelné části spektra je nejdůležitější absorpce vody v listu a obsah pigmentačních látek, z nich především chlorofylu a karotenů. Chlorofyl pohlcuje 70 % až 90 % dopadajícího záření v modré a červené části spektra. Mezi těmito absorpčními pásy se nachází lokální maximum odrazivosti v zelené části spektra, což je příčinou zelené barvy rostlin ve vegetačním období. S poklesem obsahu vody v listech se jejich spektrální odrazivost zvyšuje. Pro vegetaci je typický výrazný nárůst odrazivosti ve vlnových délkách kolem 700 nm (viz Graf 1). Proto obrazové materiály pořízené v této části spektra skýtají největší možnosti pro dobré odlišení ploch pokrytých vegetací a ploch ostatních, ale také i pro odlišení jednotlivých druhů rostlin, které mohou být z hlediska svých odrazových vlastností ve viditelné části spektra velmi podobné. Odrazivost je formována absorpčními pásy vody se středy na vlnových délkách 1 400, 1 900 a 2 700 nm. Lokální maxima odrazivosti se vyskytují na vlnových délkách 1 600 a 2 200 nm, jak je možno vidět v Grafu 1.

### Spektrální projev vegetace



**Graf 1 Spektrální projev vegetace** (zdroj: Dobrovolný, 2004)

Jak lze vysledovat z Grafu 1, ideální je skenování lesních porostů provádět laserovým paprskem o vlnových délkách odpovídajících oblasti buněčné struktury, tj. o vlnových délkách v rozmezí zhruba 700-1 350 nm. Většina laserových jednotek skenuje podle Dolanského (2004) na vlnových délkách 1 100-1 200 nm.

### 2.2.3 Interakce laserového paprsku s korunami stromů

Dále budou představeny hlavní zákonitosti, které jsou pro interakci laserového paprsku s korunami stromů příznačné.

Počet odrazů od reliéfu (země) klesá se zvětšujícím se skenovacím úhlem (Shan a Toth, 2009). Největšího počtu odrazů od terénu (LR = last returns) tedy můžeme dosáhnout při malých skenovacích úhlech. Odraz od země získáme s největší pravděpodobností při okamžitém úhlu skenování  $0^\circ$ , tzn. při vyslání paprsku k nadiru.

Míra proniknutí paprsku korunou stromu je ovlivněna divergencí (rozbíhavostí) laserového svazku (Aldred a Bonnor, 1985), (Næsset, 2004). Korunou snáze prostupují paprsky s menším průměrem stopy než paprsky se širokou stopou. Na míru proniknutí paprsku korunou stromu má také vliv citlivost laserového přijímače, vlnová délka laserového paprsku, která je blíže rozepsána v kapitole 2.2.2 Odrazivost laserového paprsku, intenzita vyslaného signálu a celková zpětně navracená energie (Baltsavias, 1999).

Laserový paprsek má tendenci pronikat korunou stromu před tím, než dojde k jeho odrazu. K tomu dochází až na výrazné překážce (tou může být zhuštěná vegetace, větev, zem). Díky této vlastnosti je možné docílit odrazů až přímo od reliéfu, které jsou pak použity k tvorbě DMR (Shan a Toth, 2009).

S větší výškou letu se mění rozložení počtů laserových odrazů od vrcholů stromů (neboli prvních odrazů, FR = first returns) a odrazů z vnitřku korun, popř. až od reliéfu (LR = last returns). Počty prvních odrazů nejsou sice měnící se výškou letu výrazně ovlivňovány, zato odrazů od reliéfu (většina LR jsou odrazy od reliéfu) ubývá. Pro určování tří nejdůležitějších biofyzikálních charakteristik porostu, kterými jsou jmenovitě střední výška stromů, výčetní základna porostu a objem dřevní hmoty, je nejvhodnější vyrovnané rozložení počtu FR a LR, myšleno konkrétně odrazů od země, (Næsset, 2004).

Při zjišťování charakteristik lesa jsou nejvyužívanější body prvních odrazů, tedy od vrcholů korun, a body posledních odrazů, speciálně však odrazů od reliéfu. Ne všechny poslední odrazy představují samotný terén. Skenování z vyšší letové hladiny vede k tomu, že je registrováno menší zastoupení kombinací prvních odrazů od vrcholů korun a posledních odrazů od reliéfu (v rámci jednoho vyslaného pulsu), a tak je ve výsledku pro analýzy struktury lesa i pro tvorbu DMR k dispozici menší počet bodů (Goodwin et al., 2006).

S narůstající letovou výškou je zaznamenáván nižší počet odrazů od jedné koruny stromu, což vede k většímu podhodnocování celkové plochy a objemu koruny (Goodwin et al., 2006). Jak je zmíněno dále, pro vyhovující stanovení parametrů koruny je žádoucí tuto korunu zachytit 6-10 odrazy.

Pokud je zvýšena frekvence vysílání pulsu (PRF = pulse repetition frequency), jednotlivé koruny stromů jsou zachyceny více odrazy (Shan a Toth, 2009).

Velice důležitým faktorem, který má vliv na přesnost měření a přesnost určení prostorové souřadnice jednotlivých bodů mračna, je užitý algoritmus pro zaznamenávání odrazů. Obzvláště

v případě full-waveform sběru dat, kde laserový detektor přijímá velké množství odrazů reprezentujících jediný vyslaný laserový paprsek (Shan a Toth, 2009).

## 2.3 Charakteristiky lesního porostu

Lze rozlišit charakteristiky lesa na úrovni základních jednotek prostorového rozdělení lesa, tedy na úrovni porostů, a charakteristiky podrobnější, na úrovni jednotlivých stromů. Na úrovni porostů je možné měřit a určovat střední výšku stromů, počet stromů, převažující druhy dřevin, výčetní základnu porostu, objem biomasy, objem dřevní hmoty, průměrný věk porostu, vykreslit hranice porostu apod. Na úrovni jednotlivých stromů lze pak zjišťovat polohu stromu, výšku stromu, druh dřeviny, výčetní tloušťku kmene, vrchní průměr kmene, věk, vzrůst, objem koruny, průměr koruny, vykreslení koruny stromu, výšku korunové základny, objem kmene atd.

Výčetní tloušťka kmene (dbh = diameter at breast height) je definována jako průměr kmene ve výšce 1,3 m nad zemí. Jedná se tedy o jednorozměrnou veličinu, průměr. Výčetní základna stromu udává plochu průřezu danou výčetní tloušťkou kmene, tj. ve výšce 1,3 m. Jedná se tedy o dvojrozměrnou veličinu, plochu. Výčetní základna porostu je pak součet výčetních základen stromů konkrétního porostu přepočtený na plochu jednoho hektaru (Mezi stromy, 200?).

Vrchní průměr představuje průměr kmene ve vrchních partiích stromu, např. ve výšce 10 m. Je-li zmíněna výška korunové základny, je myšlena výška od země k nejnižším zeleným větvím nebo k nejnižšímu celému živému větvovému přeslenu (Shan a Toth, 2009).

Objem stromu se v praxi určuje modelováním z výčetní tloušťky kmene, vrchního průměru a výšky stromu (Shan a Toth, 2009). Odhad objemu dřevní hmoty na úrovni porostu je závislý na přesnosti a správnosti nalezení a vykreslení jednotlivých korun. Čím více korun je sloučeno a vyhodnoceno jako jediný strom, tím podhodnocenější jsou odhady objemu dřevní hmoty (Hyypä et al., 2001).

Některé tyto zmíněné atributy mohou být přímo změřeny v terénu nebo vypočítány z dat tohoto terénního měření, zatímco jiné je zapotřebí odhadovat (predikovat) pomocí statistického a fyzikálního modelování. Přímá měření v terénu dosahují obvykle vysokých přesností. Výsledky šetření Päivinen et al. (1992) ukazují, že např. výčetní tloušťka kmene je měřena v terénu se směrodatnou odchylkou pohybující se v rozmezí 2,3–4,6 mm a ve výšce stromu dosahuje směrodatná odchylka hodnoty 67 cm.

V následujících odstavcích jsou představeny veličiny, které lze velice snadno, automaticky, získat z dat leteckého laserového skenování. Je snahou, aby tento automatický proces zefektivnil a postupně nahradil náročná a mnohdy méně přesná měření v terénu.

### 2.3.1 Výška stromu

Výška stromu je určována jako rozdíl mezi výškou, která představuje vrchol koruny, a výškou na terénu v místě, kam se vrchol koruny při kolmém promítání zobrazí. Vrchol koruny je běžně představován bodem lokálního výškového maxima v digitálním výškovém modelu korun (CHM



= canopy height model). CHM musí být ale nejprve filtrován nízkofrekvenčními filtry, jejichž užití vede k vyhlazení modelu. Bez filtrace by byl celkový počet korun nadhodnocen, jedna koruna by mohla být vyhodnocena jako více samostatných korun. Naopak při nadměrném opakovaném filtrování by došlo ke spojení více samostatných korun v jednu a celkový počet korun by tak byl podhodnocen (Hyypä et al., 2001).

### **Podhodnocování výšky stromu**

Letecké laserové skenování je technologií, která výšku stromů podhodnocuje. Hlavním důvodem je fakt, že se laserový paprsek mnohem pravděpodobněji odrazí od postranní větve než přímo od vrcholu, a tedy nejvyššího místa, koruny (Nelson et al., 1988). Proto je zapotřebí skenovat oblast s dostatečnou nominální hustotou (tzn. s dostatečnou bodovou frekvencí), aby se pravděpodobnost odrazu signálu od vrcholu koruny nebo alespoň od co nejbližšího okolí tohoto vrcholu zvýšila. Dále je též potřebným požadavkem, aby se laserový paprsek měl od čeho odrazit, tedy aby se v jeho blízkosti nacházelo dostatečné množství odrazivého materiálu, např. listů (Lefsky et al., 2002). Proto bude přesný vrchol stromu s větší pravděpodobností naskenován během vegetačního období než mimo něj.

Nejsou-li zaznamenány přesné odrazy od reliéfu a od vrcholu koruny, pak dochází k podhodnocení výšky stromu. Na vině mohou být následující faktory a nastavení parametrů: hustota a pokrytí oblasti laserovými pulsy, algoritmus použitý k tvorbě CHM, množství a výška podrostu, algoritmus použitý k tvorbě DMR, citlivost laserového přijímače a citlivost při zaznamenávání jednotlivých odrazů, algoritmus užitý pro zpracování signálu, míra prostupnosti paprsku do koruny stromů a též i tvar a druh dřevin (Shan a Toth, 2009).

Správné určení výšky stromu je tedy ovlivněno i přesností vygenerovaného digitálního modelu reliéfu (DMR). Při stanovování výšky reliéfu dochází často naopak k nadhodnocení skutečné výšky. Hlavní příčinou tohoto efektu je výskyt podrostu, který paprsku ztěžuje průchod až k terénu. Mnohdy jsou tak chybně vyklasifikovány jako body na reliéfu ty odrazy, které jsou ve skutečnosti ještě body na podrostu. Z provedených studií vyplývá, že se chyba z nadhodnocení skutečné výšky reliéfu vlivem podrostu pohybuje kolem 20 cm (Shan a Toth, 2009).

Vezme-li se v úvahu systematické podhodnocování výškového modelu korun (CHM) a velmi časté nadhodnocování digitálního modelu reliéfu (DMR) a dále také fakt, že výška stromu se počítá jako výškový rozdíl obou zde zmíněných modelů (CHM-DMR), je velice pravděpodobné, že výsledná výška stromu je podhodnocena.

Z poznatků Yu et al. (2004a), kteří prováděli skenování jedné oblasti ve dvou letech, vyplývá, že systematické podhodnocení výšek stromů z dat pořízených v roce 1998 činí 0,54 m a z dat o dva roky pozdějších, tj. z roku 2000, 0,67 m. Toto zvyšující se podhodnocení odpovídá 2-3 letému každoročnímu růstu těchto stromů.

Podhodnocování výšky stromů prokazuje i pokus Maltama et al. (2004, in Shan a Toth, 2009), kteří výšku 29 borovic změřili nejprve v terénu pomocí tachymetru a stejnou oblast vyhodnotili i na základě dat LLS. Výsledné podhodnocení výšek těchto borovic činilo 0,65 m.

Výzkumy Brandtberga et al. (2003) dokonce přináší poznatek, že výška stromů může být relativně spolehlivě určena i v měsících mimo vegetační období, kdy jsou lesy bez listů. Hodnota podhodnocení v opadaném listnatém lese (duby, javor černý, liliovník tulipánokvětý) byla vypočtena na 1,1 m. Od hodnot dosažených ve vegetačním období se liší o zhruba 0,45 m.

#### **Vliv letové výšky na určování výšky stromů**

Ze studie Yu et al. (2004b) vyplývá, že určování výšky stromů je závislé na letové hladině, ze které je skenování prováděno. Dle jejich závěrů platí, že s většími letovými výškami se zvětšuje chyba v odhadech výšky stromu. Při výšce skenování 400 m nad terénem se chyba ve stanovení výšky stromu pohybovala kolem 0,76 m, na letové výšce 1 500 m narostla chyba na 1,16 m. Z dalších zjištění je patrné, že s narůstající letovou výškou klesá i počet stromů, které lze z dat rozpoznat. Jedním ze závěrů je i poznatek, že nominální bodová hustota skenování ovlivňuje proces určování výšky stromu výrazněji než průměr stopy paprsku při odrazu. Zajímavostí je, že v rámci této studie byly břízy poznamenány efektem zvětšující se letové výšky a tím pádem se zvyšující chyby při stanovování výšky stromu mnohem méně než jehličnaté dřeviny.

Z větších letových výšek (1000, 2000 a 3000 m) skenovali území eukalyptového lesa Goodwin et al. (2006), a to naopak se zjištěním, že výška letu nemá žádný výrazný efekt na odhadování výšky stromů.

#### **Vliv průměru paprsku na určování výšky stromů**

Mnohé studie se svým tématem věnují i vlivu průměru laserového paprsku na přesnost určení výšky stromu. Persson et al. (2002) skenovali území paprskem o průměru v rozmezí od 0,26 m do 2,08 m a zjistili, že šířka paprsku nemá při zjišťování výšky stromu žádný významný efekt. Pouze s průměrem paprsku 3,68 m a výškou letu o 76 % větší se podhodnocení výšky stromů projevilo výrazněji, ale to bylo spíše dáno tím, že při takovémto průměru paprsku a výšce letu se podstatně snížila nominální bodová hustota skenování, která hraje v tomto případě větší roli.

Ani Nilsson (1996) svým průzkumem nepotvrzuje, že by průměr laserového paprsku odhady výšek stromů ovlivňoval. Šířka paprsku nemá markantní vliv ani dle závěrů Goodwina et al. (2006), kteří testovali průměry 0,2; 0,4 a 0,6 m. Starší studie Aldreda a Bonnora (1985) přinesla závěry, že optimální průměr paprsku je jiný pro listnaté a jiný pro jehličnaté porosty, ale zároveň průměr laserové stopy nehraje při stanovování výšek stromů zásadní roli.

### **2.3.2 Poloha stromu**

Poloha stromu je určována jako poloha lokálního výškového maxima v mračně bodů výškového modelu korun, popř. rastru. Toto lokální maximum představuje vrchol koruny a zároveň (ve většině případů) i pozici kmene stromu, tedy polohu celého stromu. Za předpokladu, že

pracujeme s rastrem a zvolíme vhodnou matici filtru a vhodné parametry pro vyhlazení rastrového snímku (s ohledem na rozměry stromů a rozlišení snímku), dostáváme speciálně v případě jehličnatých stromů relativně výborné výsledky a lokální maxima (potenciální polohy stromů) jsou s velkou přesností a správností nalezena (Shan a Toth, 2009). Na datech jehličnatých, vysokých, útlých stromů probíhá filtrační proces snadno, poloha stromu je určena s velkou přesností, protože tento typ dřevin (jehličnatých) je charakteristický zřetelnou špičkou (výjimkou mohou být borovice), která odpovídá poloze spodní části kmene. Oproti tomu nalezení polohy listnatých stromů je náročnější vzhledem k tomu, že tyto stromy mívají několik vedlejších korun, popř. hlavní koruna je rozsáhlá a s více lokálními vrcholy.

Výsledek určení polohy stromu je velice závislý na použitém algoritmu pro detekci a vykreslení jednotlivých korun, který zajistí, aby při příliš slabé filtraci nebyla jedna koruna vyhodnocena jako více samostatných korun, naopak aby při nadměrné filtraci nebylo více korun spojeno a vyhodnoceno jako 1 koruna. A výsledná poloha stromu dále závisí na správném vyhledání lokálního výškového maxima v rámci těchto vykreslených korun.

### 2.3.3 Druh dřeviny

Určování druhů dřevin probíhá ve většině případů za současné interpretace leteckých snímků (Hyypä et al., 2001). Na nich jsou díky své rozdílné odrazivosti relativně snadno rozeznatelné jehličnaté stromy, které jsou charakteristické nižší reflektivitou, od listnatých dřevin s vyššími hodnotami odrazivosti (Wehr a Lohr, 1999). Odlišení mezi konkrétními listnatými stromy, resp. jehličnatými, probíhá na základě lišících se proměnných, které popisují strukturu větví, tvar koruny, barvu (Holmgren a Persson, 2004).

Snahou je však tento proces automatizovat a provádět přímo na datech laserového skenování. S vývojem této technologie dochází už i k tomu, že při sběru dat LLS, jsou zaznamenávány hodnoty navrácené energie v podobě výšky amplitudy navrácené vlny a též je zachycován průměr stopy návratového pulsu (Riegl, 2009). Výška amplitudy vlny je tím větší, čím je větší reflektivita objektu. Šířka návratového pulsu je tím menší, od čím rovnějšího a hladšího povrchu se paprsek odrazil. Na základě těchto údajů a údajů o tvaru koruny, popř. dalších, jsou vytvořeny modely charakterizující jednotlivé druhy dřevin. Holmgren a Persson (2004) například uvádějí, že rozdíl mezi smrkem a borovicí lze snadno zjistit z analýzy tvaru koruny, kdy pro smrk je typický výrazný kuželový tvar oproti borovici.

### 2.3.4 Vykreslení koruny

Pro vykreslení koruny stromu je nejprve nutné, v některých případech, najít lokální výškové maximum, odkud pak může pokračovat algoritmus pro vyhledání okraje koruny. Tímto algoritmem může být *region segmentation*, hranový detektor nebo detektor pro nalezení lokálního minima. Plnohodnotné vykreslení koruny lze provést i technikou *shade-valley-following*, analýzou zakřivení hran (*edge curvature analysis*), *template matching*, *region growing* nebo rekonstrukcí na základě mračna bodů (*point cloud based reconstruction*) (Shan a Toth, 2009).

Magnussen et al. (1999, in Persson, 2002) doporučují, že pro vykreslení koruny je potřeba, aby byl strom zachycen alespoň 6-10 laserovými odrazy.

Podle závěrů Matsueho et al. (2006, in Hirata et al., 2009) je náročnost identifikace a vykreslení jednotlivých korun stromů dána hlavně hustotou porostu, snáze bude identifikace probíhat v řídkých porostech, kde jsou stromy od sebe dostatečně daleko vzdáleny a koruny se příliš neprolínají, a tvarem korun stromů, který se odvíjí od druhu dřeviny.

## 2.4 Vytváření digitálního modelu reliéfu, metody filtrace

### 2.4.1 Definice DMR a DMP

#### DMR = digitální model reliéfu

Jedná se o „digitální model topografického povrchu reprezentovaný pravidelně nebo nepravidelně rozmístěnými výškovými body, které odpovídají holému, rostlému terénu (bez vegetace a antropogenních prvků)“ (Höhle a Potůčková, 2010, s. 1).

Slovník VÚGTK (2010) definuje digitální model reliéfu jako „digitální reprezentaci zemského povrchu v paměti počítače, složenou z dat a interpolačního algoritmu, který umožňuje mj. odvozovat výšky mezilehlých bodů“.

V angličtině odpovídá pojmu digitální model reliéfu výraz a zkratka DTM = Digital Terrain Model.

#### DMP = digitální model povrchu

Jedná se o „digitální model topografického povrchu reprezentovaný pravidelně nebo nepravidelně rozmístěnými výškovými body, které zobrazují svrchní povrch vegetace, budov a dalších prvků vyvýšených nad holý, rostlý terén“ (Höhle a Potůčková, 2010, s. 1).

Slovník VÚGTK (2010) definuje digitální model povrchu jako „zvláštní případ digitálního modelu reliéfu konstruovaného zpravidla s využitím automatických prostředků (např. obrazové korelace ve fotogrammetrii) tak, že zobrazuje povrch terénu a vrchní plochy všech objektů na něm (střechy, koruny stromů apod.)“.

V angličtině odpovídá pojmu digitální model povrchu výraz a zkratka DSM = Digital Surface Model.



Obr. 7 Rozdíl mezi digitálním modelem reliéfu (vlevo) a digitálním modelem povrchu (vpravo)  
(zdroj: Höhle a Potůčková, 2010, s. 1)

### 2.4.2 Tvorba digitálního modelu reliéfu

Pořizování DMR v zalesněném území a ve velkém měřítku je za použití dosud běžně užívaných metod, jakou je např. letecká fotogrammetrie, svou přesností nedostačující. Zvláště v oblasti lesních porostů často není možno DMR vůbec získat. Pro určení prostorové souřadnice bodu je totiž nutné jedno místo na povrchu nasnímat alespoň ze dvou pozic letadla, aby mohl vzniknout stereoskopický vjem. A to je v místech hustších lesních porostů mnohdy neproveditelné.

S novým a polohově i výškově přesnějším řešením, které se dokáže prosadit především v oblasti lesů, přichází letecké laserové skenování. Z dat LLS lze totiž vygenerovat DMR zalesněného území s takovou přesností, která se vyrovná přesnosti DMR otevřeného (nezalesněného) území, jenž by se získal leteckou fotogrammetrií z širokoúhlých snímků v měřítku 1 : 7 000 (Kraus a Pfeifer, 1998).

V rovinatých zalesněných terénech činí výšková přesnost LLS modelu  $\pm 25$  cm, po post-processingových úpravách, kdy jsou odstraňovány systematické chyby, je možné dosáhnout přesnosti ve výšce modelu  $\pm 10$  cm (Kraus a Pfeifer, 1998). Toto platí pro výšku letu 1000 m.

Data leteckého laserového skenování jsou získána v podobě tzv. mračna bodů, což je dle Štronera a Pospíšila (2008, s. 14) „soubor zaměřených bodů ve 3D na povrchu skenovaného objektu“, nebo území, kdy „jednotlivé body jsou měřeny neselektivně (nereprezentují vybrané charakteristické body objektu, jako jsou hrany, vrcholy apod.)“.

Mračno bodů následně podléhá prvotní filtraci, kdy jsou odstraněny nežádoucí body v podobě hrubých chyb, a základní klasifikaci na body ležící na terénu a body reprezentující vegetaci. Při použití vhodných filtračních a interpolačních metod probíhá tato klasifikace automaticky. Kraus a Pfeifer (1998) ještě dodávají, že tento automatický proces může fungovat pouze za podmínky, že vegetaci proniká alespoň 25 % laserových paprsků a body na vegetaci a v terénu jsou rovnoměrně promíchány.

Pro to, aby došlo k správnému a přesnému vytvoření DMR, je nutné eliminovat všechny body na vegetaci a ponechat body na samotném terénu (ty jsou získány většinou jako body posledních odrazů, LR = last returns), což může být v oblastech s nízkou mírou pronikavosti laserového paprsku mnohdy obtížné. Výsledná podoba a přesnost získaného DMR je tedy velmi závislá na použité filtrační metodě.

### 2.4.3 Filtrační metody

Dolanský (2004) vyděluje tři základní skupiny filtrů:

#### A. Morfologické filtry

Patří mezi ně dilatace, eroze, jejich kombinací pak vznikají filtry otevření a uzavření. Tyto filtry zajišťují optimální rekonstrukci tvarů objektů. Nejčastěji jsou tyto filtry používány na rastrových datech, lze jimi ale filtrovat i neuspořádané mračno bodů, popř. i vektorově reprezentované objekty.

Při dilataci je v rámci strukturálního filtračního elementu vyhledána nejvyšší hodnota a ta je přiřazena pixelu, pro který je právě filtrace prováděna. Dilatace vede k vyplnění mezer a vyhlazení obrysů objektu. Eroze probíhá za vyhledávání nejnižších hodnot v rámci elementární oblasti, které jsou následně přidělovány aktuálně filtrovaným pixelům. Výsledkem eroze je vypuštění úzkých objektů a narušení obrysů. Otevření je výsledkem eroze následované dilatací s transponovaným strukturálním elementem. Otevření odstraní objekty menší než je strukturální element. Uzavření je naopak kombinací dilatace, která je následována erozí s transponovanou elementární množinou, což má za následek vyplnění mezer v datech (Dolanský, 2004).

V praxi se často přistupuje k iterativnímu způsobu filtrování, kdy s každým dalším opakováním je strukturální element zvětšován.

### **B. Filtry založené na porovnávání sklonu**

Tyto filtry porovnávají každý bod s body v jeho nejbližším okolí. Mezi testovanými body je určen výškový rozdíl a vypočten sklon. Pokud se sklon nalézá v předem definovaných mezích, lze bod považovat za bod na terénu.

Do této skupiny filtrů řadí Dolanský (2004) metodu *Region Growing*. Nejprve je nutné nalézt uzlový bod, který je s jistotou bodem na terénu. Od něj probíhá porovnávání s body v okolí, které jsou klasifikovány jako terénní body, pokud se jejich sklon nachází v definovaných mezích. Další testování pak pokračuje od těchto bodů a postupuje dál, dokud existuje alespoň jeden bod spadající do daných mezí sklonu. Odpadají tak výpočty sklonů pro každý bod s každým v okolí, což zkracuje dobu filtrace, zato však je nutné vytvořit síť s dostatečným počtem počátečních uzlových bodů.

### **C. Lineární predikce**

Lineární predikce je statistickou interpolační operací využívající metodu nejmenších čtverců. V rámci algoritmu jsou nejprve definovány vazby mezi sousedními body a je stanoven přibližný průběh terénu na bázi průměrné výšky. Pro každý bod jsou vypočteny odchylky od tohoto přibližného průběhu terénu, na jejichž základě je posléze všem bodům přidělena váha. Následně jsou odstraněny body, které přesahují vymezenou toleranci, je zpřesněn průběh terénu, vypočteny nové odchylky a váhy bodů a tato iterace pokračuje s novou množinou, dokud jsou z ní nějaké body odstraňovány, jak vysvětluje Dolanský (2004).

V rovinatých oblastech nezáleží na tom, která z výše uvedených filtračních metod bude užitá. Výsledné DMR se od sebe moc neliší a dosahují relativně stejných výškových přesností. Naopak ve svažitých terénech už zvolená metoda hraje významnou roli ve výsledné přesnosti. Doporučuje se použít statistické vyhodnocování, vhodně např. lineární predikci, která zachovává nejvíce jemných detailů v průběhu terénu (Dolanský, 2004). Dokazuje to i experiment podle Krause a Pfeifera (1998), kdy mračno bodů bylo filtrováno nejprve metodou lineární predikce se třemi opakováními. 47,8 % bodů bylo klasifikováno jako body na vegetaci.

Stejná data byla zpracována i morfologickými filtry s výslednými 51,0 % bodů reprezentujících vegetaci. Terén byl v tomto případě charakterizován méně body (49,0 %) než při použití lineární predikce (52,2 %), a zároveň zde nebyly zachyceny významné geomorfologické prvky, jakými jsou např. terénní zlomy, hrany, příkopy.

Vrstevnice vygenerované z DMR zalesněného území, který byl pořízen leteckým laserovým skenováním, jsou charakteristické výbornou plasticitou. Nedostatky ve vykreslení geomorfologických detailů však zůstávají v místech s přirozenými zlomy, tj. v místech údolnic, hlubokých rýh apod. (Kraus a Pfeifer, 1998).

#### 2.4.4 Mezinárodní spolupráce a vzájemná výměna poznatků

Generování DMR a hledání nejvhodnějšího algoritmu je mezistátní záležitostí a jednotlivé země mezi sebou porovnávají metody, které k získání DMR používají, a vyměňují si vzájemně informace. Jeden z prvních mezinárodních projektů, který si za cíl kladl porovnání tří různých algoritmů k tvorbě DMR, se uskutečnil v letech 1998-2001 a srovnání probíhalo ve třech lesních lokalitách, ve Finsku (oblast Kalkkinen, hustota skenování 10 bodů/m<sup>2</sup>), v Rakousku (oblast Hohentauern, hustota skenování 4-5 bodů/m<sup>2</sup>) a ve Švýcarsku (oblast Zumikon, hustota skenování 4-5 bodů/m<sup>2</sup>). Použitou skenovací jednotkou byl TopoSys-1 s bodovou frekvencí 83 kHz, což odpovídá nominální hustotě skenování zhruba 4 body/m<sup>2</sup> z výšky 800 m nad terénem, popř. nominální hustotě 10 bodů/m<sup>2</sup> z výšky 400 m nad terénem. Hodnota náhodné chyby<sup>2</sup> ze získaných DMR se pohybovala od 23 do 40 cm. Nejdůležitějšími parametry, které ovlivňují přesnost výsledného digitálního modelu reliéfu, byly dle Hyypä et al. (2001) shledány:

- hustota vegetace, která má vliv na celkový počet odrazů přímo od reliéfu,
- dostupnost prvních a posledních odrazů; dostatečný počet posledních odrazů je nutný pro správné a přesné vygenerování DMR,
- jednotlivá nastavení prahů,
- požadované rozlišení.

Kraus (2007) ještě dodává, že přesnost digitálního modelu reliéfu je významně závislá na bodové hustotě skenování. Ta je samotná ovlivňovaná výškou a rychlostí letu a frekvencí vysílání pulsu (PRF). S vyšší hustotou skenování lze dosáhnout přesnějších, kvalitnějších a geomorfologicky výstižnějších DMR.

Dále jsou taktéž detailně porovnávány filtrační metody užívané při extrahování DMR anebo též přesnost takto získaného DMR s ohledem na lišící se datum skenování (kde největší roli hraje to, pořizují-li se data ve vegetačním období nebo mimo něj, kdy jsou lesy odlistěné), typ

<sup>2</sup> Podle příčiny vzniku dělí Šťastný (1997) chyby měření do tří skupin:

- **Chyby hrubé – omyly.** Kontrolou se dají poměrně snadno odhalit a jejich vliv na měření je možné vyloučit.
- **Chyby soustavné – systematické.** Jsou způsobeny neustále stejnou příčinou. Při mnohonásobném opakování téhož měření je naměřená hodnota soustavně vyšší nebo nižší než skutečná hodnota. Lze rozlišit chyby metody, chyby metody vyhodnocení, chybné stanovení podmínek měření a chyby přístrojů.
- **Chyby nahodilé – náhodné.** Nejeví známky pravidelnosti, nedaří se objevit jejich příčiny ani odstranit jejich vliv na měření.

lesa, výšku letu, mód vysílané vlny (tj. full-waveform nebo non-waveform), sklonitost terénu (Hyypä et al., 2005) a úhel skenování (Ahokas et al., 2005).

**Vliv data pořízení.** Pro střední Evropu jsou při pořizování dat pro tvorbu DMR příznačné tyto požadavky:

- využívat mód posledního odrazu,
- skenovat mimo vegetační období, kdy jsou stromy bez listí,
- skenovat v období, kdy není napadáný sníh, který mj. znemožňuje dopad signálu až přímo na reliéf.

Dnů, které těmto podmínkám vyhovují, může být během roku poměrně málo. Například ve Finsku bývá sněhová pokrývka od října-prosince do března-května, což optimální dobu pro skenování zkracuje na 2-5 týdnů v roce (poté přichází vegetační období a na podzim skenování též není vhodné, protože lesní podrost se drží až do příchodu sněhu). Nejvhodnější je tedy data pořizovat mimo vegetační období. Náhodná chyba DMR se v takových dnech dle Hyypä et al. (2005) pohybuje mezi 7-17 cm. Ve vegetačním období vzrostla náhodná chyba o 3-9 cm, což ale celkově bylo méně, než se očekávalo, a i v období olistění lze tedy dosáhnout relativně dobré přesnosti.

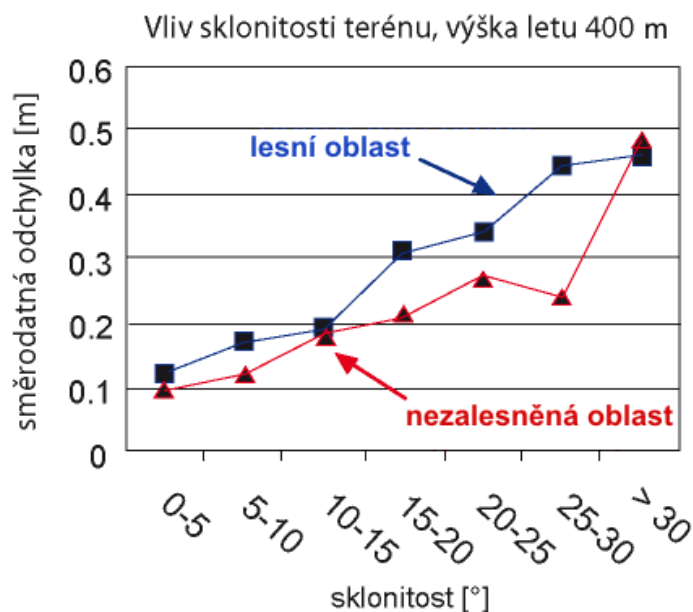
**Vliv vegetace a typu lesa.** Ze zjištění Hyypä et al. (2005) vyplývá, že rozdíly mezi DMR získanými v optimálních podmínkách, tj. mimo vegetační dobu, a DMR získanými ve ztížených (zarostlých, olistěných) podmínkách jsou menší než 5 cm. V listnatých porostech jsou sezónní vlivy nejviditelnější. Čím hustší koruny stromů jsou, tím méně paprsků projde až na reliéf a tím nižší je počet odrazů od reliéfu.

**Vliv letové výšky.** S rostoucí výškou letu (a stálou bodovou frekvencí skenování) logicky klesá hustota skenování v příčném směru, tj. kolmo na směr letu. Dle Hyypä et al. (2005) byl z výšek 400, 800 a 1500 m nad terénem rozestup bodů v příčném směru 0,8; 1,6 resp. 3 m. K tomu odpovídající průměry paprsku při odrazu od povrchu 0,4; 0,8 resp. 1,5 m, které se tedy s rostoucí výškou lineárně zvětšují. Dalším poznatkem je fakt, že se vzrůstající letovou výškou ze 400 m na 1500 m narostla náhodná chyba DMR o 50 % (z 12 cm na 18 cm).

**Vliv sklonitosti terénu.** Jak je možné vyčíst z Grafu 2, v rovinatých zalesněných terénech, do sklonitosti cca 10 °, lze dosáhnout náhodné chyby do 20 cm. Náhodná chyba narůstá spolu s rostoucí sklonitostí terénu, a to mnohem rychleji v datech zalesněných oblastí než v otevřených bezlesých oblastech (Hyypä et al., 2005).

**Vliv úhlu skenování.** Závěry studie Ahokase et al. (2005) sdělují, že úhel skenování má skutečně vliv na přesnost digitálního modelu reliéfu, ale ne větší než ostatní výše zmíněné faktory. Optimální úhel pro pořizování dat v lesních oblastech je do 15 °.





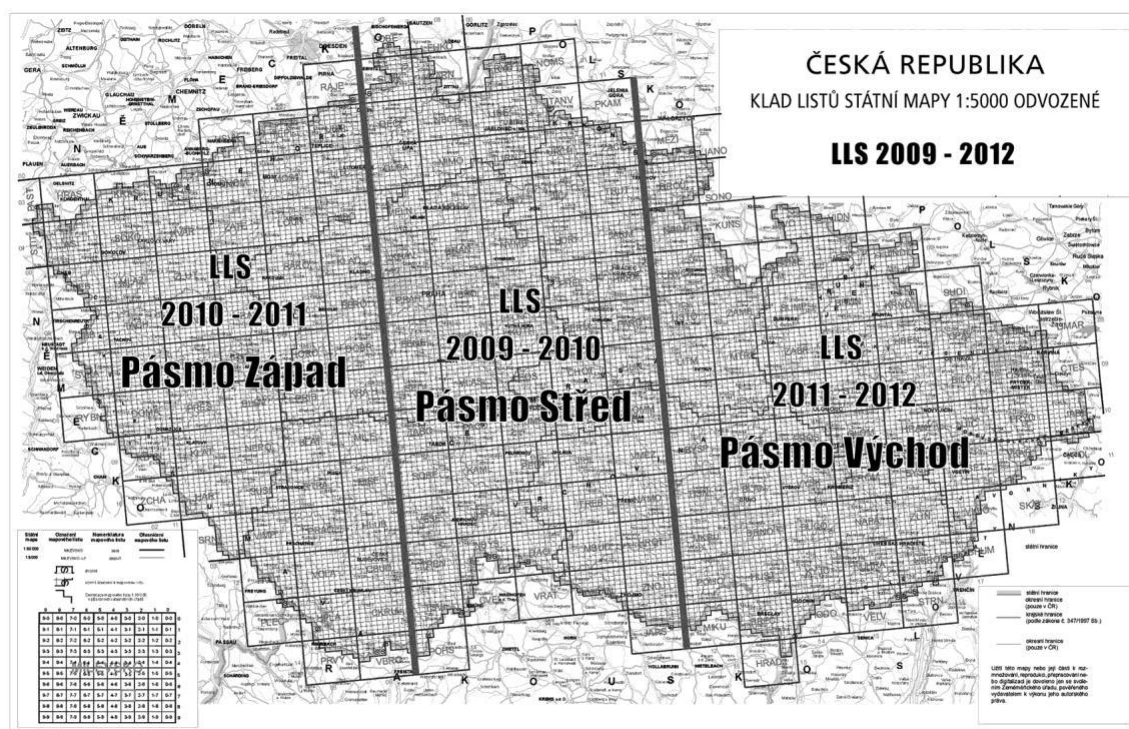
Graf 2 Vliv sklonitosti terénu na přesnost DMR (zdroj: upraveno dle Hyypä et al., 2005, s. 88)

## 2.6 Projekt leteckého laserového skenování ČR

Český úřad zeměměřický a katastrální zahájil ve spolupráci s Ministerstvem zemědělství ČR a s Ministerstvem obrany ČR v listopadu 2009 nové výškopisné mapování území České republiky. Pro realizaci projektu je užita digitální technologie leteckého laserového skenování. Dle návrhu probíhá skenování republiky postupně ve třech pásmech, pásmo Střed v letech 2009-2010, dále pásmo Západ v letech 2010-2011, následně pásmo Východ v letech 2011-2012, jak specifikuje obrázek (Obr. 8).

Vzdálenost letových řad je stanovena na 750-850 m, příčný překryt od 35 do 50 %, střední výška letu nad terénem na maximálně 1 500 m, nominální bodová hustota skenování větší než 1 bod/m<sup>2</sup> a střední chyba měření výšky menší než 0,1 m. Území je skenováno po blocích o rozměrech až 10 × 30 km a v jedné ze tří nadmořských výšek letu (letových hladin) v závislosti na členitosti a relativní výšce terénu, a to 1 800, 2 100 a 2 400 m n. m. Je nutné, aby měření probíhalo mimo vegetační období, kdy laserový paprsek snáze proniká skrze vegetaci až na reliéf (Brázdil, 2009).

Na projektu se výše zmíněné subjekty podílejí následovným způsobem. Zeměměřický odbor Zeměměřického úřadu v Pardubicích ve spolupráci s oddělením fotogrammetrie Vojenského geografického a hydrometeorologického úřadu v Dobrušce zajišťují zpracování naskenovaných dat a tvorbu výsledných digitálních modelů. Ke zpracování mračna bodů, filtraci a klasifikaci dat, budou použity softwarové nástroje ze skupiny programů SCOP++ (od německé firmy INPHO GmbH) a tvorba digitálních modelů bude probíhat v software a nadstavbách ArcGIS z produkce firmy ESRI. Ministerstvo obrany ČR poskytuje letadlo typu L 410 FG a dává k dispozici své odborné kapacity. Ministerstvo zemědělství ČR hradí náklady spojené s pronájmem leteckého laserového skeneru RIEGL 680, jak uvádí Brázdil (2009).



**Obr. 8** Pásma leteckého laserového skenování území ČR (zdroj: Brázdil, 2009, s. 5)

Cílem a hlavním záměrem celého projektu je vytvoření nové a přesnější digitální výškopisné databáze území České republiky. Dle Brázdila (2009) mají vzniknout tři výsledné výškopisné produkty:

- Digitální model reliéfu území České republiky 4. generace (DMR 4G). Výstup bude ve formě mříže (GRID)  $5 \times 5$  m, střední chyba výšky 0,30 m v nezalesněném a 1 m v zalesněném terénu. Počítá se s vyhotovením do konce roku 2012. DMR 4G bude sloužit k uspokojení prvotní poptávky těch uživatelů, kterým vyhoví takto vytvořená přesnost a hustota dat.
- Digitální model reliéfu území České republiky 5. generace (DMR 5G). Výstupem bude nepravidelná trojúhelníková síť vybraných výškových bodů (TIN), střední chyba výšky 0,18 m v nezalesněném a 0,3 m v zalesněném terénu. Vyhotovení je v plánu do konce roku 2015 a tento digitální model reliéfu 5. generace se stane základním výškovým modelem území České republiky.
- Digitální model povrchu území České republiky 1. generace (DMP 1G) též ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě vybraných výškových bodů (TIN), se střední chybou výšky 0,4 m pro přesně prostorově vymezené objekty (budovy) a 0,7 m pro objekty přesně neohraničené (lesy a další prvky rostlinného půdního krytu). Vyhotoven bude do konce roku 2015 a stejně jako DMR 5G se stane základním výškovým modelem území České republiky.

Všechny výsledné digitální modely budou transformovány jednak do souřadnicového referenčního systému S-JTSK, jednak do WGS-84. Výškovým systémem bude baltský – po vyrovnání (Bpv), jak zmiňuje Brázdil (2009).

Tyto nové a přesnější výškové modely nahradí stávající výškopisné databáze ČR, jejichž přesnost a další parametry uvádí tabulka (Tab. 2).

**Tab. 2 Současné výškopisné modely České republiky** (zdroj: upraveno podle Brázdil, 2009, s. 2)

Název databáze	Obsah	Střední chyba výšky [m]
<b>ZABAGED® - výškopis</b>	Vektorizované vrstevnice Základní mapy 1 : 10 000 uložené jako 3D objekty ve formátu DGN.	0,7-1,5 m v odkrytém terénu 1-2 m v intravilánech 2-5 m v zalesněných územích
<b>ZABAGED® - zdokonalený výškopis</b>	Aktualizované a zpřesněné vrstevnice Základní mapy 1 : 10 000, doplněné o terénní hrany náspů, výkopů, břehů, nádrží apod.	0,7-1,5 m v odkrytém terénu 1-2 m v intravilánech 2-5 m v zalesněných územích
<b>ZABAGED® - mříž 10 × 10 m</b>	Odvozený model z databáze ZABAGED® - zdokonalený výškopis do formy mříže (GRID) 10 × 10 m.	1,5-2,5 m v odkrytém terénu 2-3 m v intravilánech 3-7 m v zalesněných územích
<b>DMR 2,5. generace</b>	Výškový model ve formě mříže (GRID) 100 × 100 m.	3-5 m v odkrytém terénu 5-8 m v intravilánech 10-15 m v zalesněných územích
<b>DMR 3. generace</b>	Výškový model ve formě nepravidelné trojúhelníkové sítě (TIN) získaný stereofotogrammetrickou metodou	1-2 m v odkrytém terénu 1-2 m v intravilánech 3-7 m v zalesněných územích
<b>DMP</b>	neexistuje	neexistuje

### 3. DATA A METODIKA ZPRACOVÁNÍ

Cílem praktické části této práce je z dat leteckého laserového skenování stanovit:

- 1) průchodnost laserového paprsku různými druhy lesa (listnatý, jehličnatý, smíšený),
- 2) střední výšku stromů v zájmových územích,
- 3) v rámci analýz též vytvořit digitální model reliéfu
- 4) a zhodnotit, zda je užitá hustota mračna bodů reálně využitelná pro získávání informací o lesních porostech.

#### 3.1 Data

Data pocházejí z pilotního projektu leteckého laserového skenování ve zkušebních lokalitách Sobotka a Dobruška. Jde o testovací (zkušební) data v rámci přípravy projektu laserového skenování ČR za účelem vytvoření nového digitálního modelu terénu. Projekt realizoval Zeměměřický úřad ve spolupráci s Armádou ČR, konkrétně 24. základnou dopravního letectva Praha-Kbely, a ve spolupráci se společností RIEGL. Sběr dat probíhal v mimovegetačním období, kdy byly stromy neolístěny, dne 24. 4. 2008 v obou lokalitách.

Data byla pořízena skenerem RIEGL LMS-Q560. Vysílaný laserový paprsek o vlnové délce blízkého infračerveného záření může být vysílán s frekvencí až 240 kHz, v případě zkušebních lokalit Sobotka a Dobruška byla frekvence vysílání paprsku 50 kHz, což vzhledem k výšce skenování 1 200-1 500 m nad střední výškou terénu zajistilo hustotu skenování 1-1,5 bodu/m<sup>2</sup>. Vychylování paprsku v příčném směru (kolmém na směr letu letadla) je zajištěno rotujícím zrcadlem. Posun paprsku v podélném směru je pak zaručen samotným pohybem letadla. Měřená data mají tak podobu paralelních řad bodů. Skener LMS-Q560 měří vzdálenosti s přesností 20 mm. Vzdálenosti jsou určovány elektronicky, impulsním dálkoměrem, který měří velice přesnými vnitřními hodinami tranzitní čas. Divergence (rozbíhavost) laserového paprsku je menší než 0,5 mrad (Riegl, 2009). Skener zaznamenává v rámci full-waveform sběru dat neomezené množství odrazů náležící jednomu vyslanému pulsu.

Poloha letadla v prostoru je určována pomocí GPS, konkrétně metodou DGPS (diferenční GPS). Nejjednodušší variantou je umístit jednu referenční stanici na známý geodetický bod

a jednu stanici na palubu letadla (Dolanský, 2004). Poloha letadla je aktualizována s frekvencí 2 Hz, tj. každých 0,5 s, a je získávána v souřadnicovém referenčním systému WGS-84.

Navigační jednotka IMU/INS (inerciální navigační systém) na palubě letadla určuje za využití systému gyroskopů a akcelerometrů náklony letadla (podélný náklon, příčný náklon a stočení v rovině letu), a tedy i skeneru, vzhledem k tížnici a zároveň měří i zrychlení, jak uvádí Dolanský (2004). O tato měření je pak zpřesňována trajektorie letu.

Mračno bodů bylo původně zpracováno zaměstnanci firmy RIEGL v software RiPROCESS verze 1.3.0, resp. v modulech RiANALYZE a RiWORLD, od firmy RIEGL a uloženo do binárního formátu sdw. Tento formát ukládá každý odraz jako samostatný záznam. V atributové tabulce jsou k nalezení mimo jiné sloupce X, Y, Z, kde jsou uloženy hodnoty prostorových souřadnic bodu v geocentrických souřadnicích WGS-84, dále sloupec TARGET, který udává pořadí odrazu, a sloupec NUMTARGET, který udává celkový počet odrazů zaznamenaných pro jeden vyslaný puls (Riegl, 2009). Například TARGET = 2, NUMTARGET = 5 znamená, že se jedná o druhý odraz z pěti. Speciálně TARGET = 1 představuje první odraz (FR) a TARGET = NUMTARGET udává poslední odraz (LR).

Pro zpracování dat byl použit software ArcGIS, verze 9.3, od firmy ESRI. Pro práci v tomto programu je ale formát sdw nepoužitelný, proto bylo mračno bodů z formátu sdw konvertováno a dodáno jednak ve formátu shp, jednak v textovém formátu ASCII. Konverzí byly souřadnice X, Y bodů převedeny z geocentrických souřadnic WGS-84 do Křovákova zobrazení, hodnoty souřadnice Z jsou elipsoidickou výškou nad Besselovým elipsoidem. Veškeré analýzy nakonec probíhaly pouze se shp.

K dispozici dále jsou data Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem (ÚHÚL). Jedná se o lesnické mapy typologické z lokalit Sobotka a Dobruška a o záznamy z hospodářských knih pro každé vybrané zájmové území. Hospodářská kniha je součástí Lesního hospodářského plánu.

### 3.2 Charakteristika zájmových území

Bylo vybráno 6 zájmových území, 3 v lokalitě Dobruška a 3 v lokalitě Sobotka. Vždy se jedná o čtvercová území  $20 \times 20$  m představující v obou lokalitách vzorek listnatého, jehličnatého a smíšeného lesa. Zájmová území byla vybrána v rovinnatých terénech, aby mohl být jednoznačně vytvořen digitální model reliéfu. Maximální převýšení ve čtverci činí 1,15 m v listnatém lese na Sobotecku. Ve všech případech se jedná o rovnoměrné pozvolné stoupání/klesání ve čtverci. Terénní průzkum potvrzuje, že v žádném ze zájmových území nejsou k nalezení výrazné členité tvary, např. jámy, prohlubně, kupy apod. Další převýšení uvádí tabulka (Tab. 3).

Tab. 3 Převýšení v zájmových územích (zdroj: autor)

ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	MIN ELIPSOIDICKÁ VÝŠKA [m]	MAX ELIPSOIDICKÁ VÝŠKA [m]	PŘEVÝŠENÍ [m]
Dobruška listnatý les	278,56	279,29	0,73
Dobruška jehličnatý les	276,02	276,68	0,66
Dobruška smíšený les	277,67	278,23	0,56
Sobotka listnatý les	343,25	344,40	1,15
Sobotka jehličnatý les	342,98	343,76	0,78
Sobotka smíšený les	345,51	346,41	0,90

Druh lesa, tedy zda se jedná o listnatý, jehličnatý či smíšený les, byl určen z ortofot:

- Ortofoto 0,5 m GEODIS (2005-2008) dostupné přes ArcIMS Server geoportálu Cenia (<http://geoportal.cenia.cz>).
- Šedotónové ortofoto (1998-2001) dostupné přes WMS Server geoportálu Ústavu pro hospodářskou úpravu lesů ([http://geoportal2.uhul.cz/wms\\_oprl?SERVICE=WMS](http://geoportal2.uhul.cz/wms_oprl?SERVICE=WMS)).

Černobílé ortofoto je sice staršího data, pochází ze snímkování v letech 1998-2001, ale bylo pořízeno v mimovegetačním období, lze tedy jednoduše určit, jedná-li se o les jehličnatý, který je na snímcích tmavý díky neopadaným jehlicím, nebo o les listnatý, na snímcích světlý, skrze opadané listy je vidět až na reliéf.

Správnost určení druhu lesa byla potvrzena i terénním průzkumem.

### 3.2.1 Lokalita Dobruška

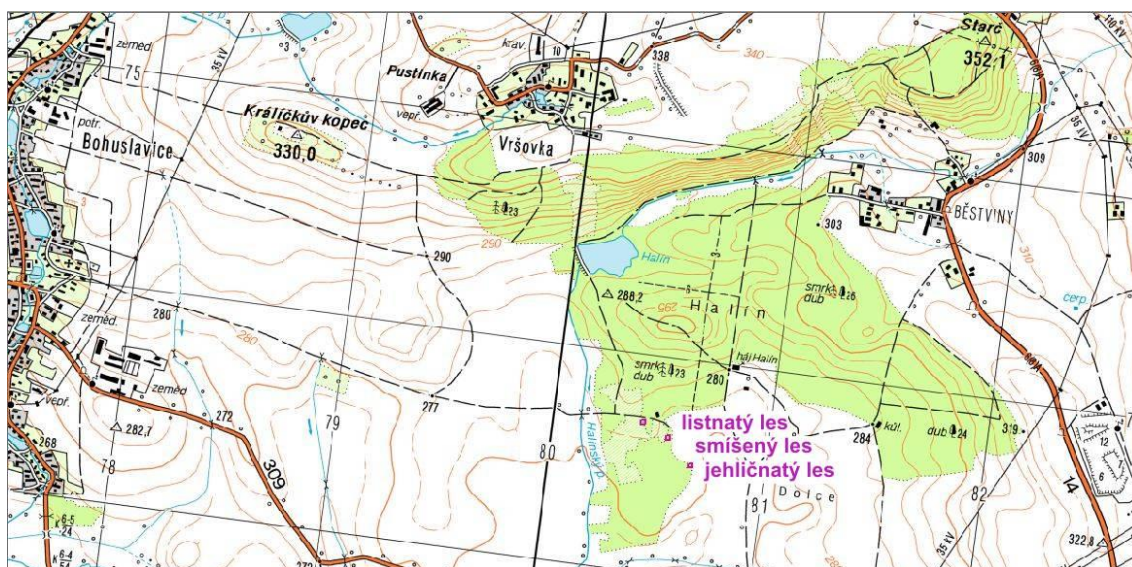
Jedná se o lokalitu ve východní části Královéhradeckého kraje, která se rozkládá mezi obcemi Nové Město nad Metují (na severu), Vršovka a Pohoří (na západě), Opočno a Semechnice (na jihu) a Domašín a Provoz (na východě). Rozloha naskenovaného území je asi 49 km<sup>2</sup>. V území se nachází 12 obcí včetně Dobrušky – Běstvin, Dobruška, Doly, Chlístov, Křovice, Melčany, část Opočna, Provoz, Pulice, Spy, Val, Vršovka. Oblast je poměrně intenzivně zemědělsky využívána, orná půda pokrývá odhadem 50 %, lesy 40 % a sídla 10 % rozlohy území.

Nadmořská výška území se pohybuje od 275 m n. m. do 420 m n. m. Zemědělsky využívané oblasti, které představují většinu rozlohy území, jsou mírně sklonité, se sklonem do 5 %. Lesní oblasti jsou členitější a sklonitější, se sklonem kolem 10 %.

Skenování bylo prováděno z výšky cca 1 200 m nad střední výškou terénu a s hustotou skenování 1,2 bodu/m<sup>2</sup>.

Vybraná 3 zájmová území jsou situovaná v lese mezi obcemi Bohuslavice a Běstvin, jak lze vidět na obrázku (Obr. 9).





Obr. 9 Zájmová území v lokalitě Dobruška (zdroj: <http://geoportal.cenia.cz>)

Na základě terénního průzkumu bylo zjištěno, že ve čtverci **listnatého lesa**<sup>3</sup> se nachází asi 36 stromů, z toho 5 lip malolistých (*Tilia cordata*), 2 javory babyka (*Acer campestre*), 1 javor klen (*Acer pseudoplatanus*), 2 smrky ztepilé (*Picea abies*) a dominantní dřevinou je 26 dubů letních (*Quercus robur*). Pouze duby a smrky dosahují průměrné výšky 24 m, ostatní dřeviny jsou vzrůstem nižší, maximálně do 12 m. Průměrná výčetní tloušťka kmene dominantních dubů činí 30-40 cm. Průměrný rozestup stromů<sup>4</sup> v tomto čtverci je 3,3 m. Zájmové území je charakteristické nízkým, asi 20cm, podrostem ostružin a trav, které ale, dá se předpokládat, zde jsou pouze ve vegetačním období.

Ve čtverci **jehličnatého lesa** bylo terénním průzkumem zjištěno 66 stromů, z toho 2 duby letní (*Quercus robur*) vysoké asi jen 14 m a zbylých 64 smrků ztepilých (*Picea abies*). Čtverec svou severní a východní hranou kopíruje kraj lesa. Tento kraj lesa je lemován asi 1 m širokým a 2 m vysokým pásem křovin. V severovýchodním rohu čtverce se nachází posed. Zájmové území je porostlé 25 cm vysokým a ne příliš hustým podrostem netýkavky malokvěté (*Impatiens parviflora*), která se zde mimo vegetační období nevyskytuje. Průměrná výška stromů je asi 20 m, průměrná výčetní tloušťka kmene asi 20-25 cm. Rozestup stromů v tomto čtverci je 2,5 m. Porost lze charakterizovat jako mírný hustník, větve smrků se vyskytují již od výšky zhruba 3 m.

Ve čtverci **smíšeného lesa** jsou rovnoměrně promíchány listnaté i jehličnaté dřeviny. Terénním průzkumem bylo zjištěno 25 vzrostlých stromů a velké množství nízkých mladých dřevin tvořících 2. patro lesa. Mezi vzrostlými stromy je 1 modřín opadavý (*Larix decidua*), 4 borovice lesní (*Pinus sylvestris*) a 20 dubů letních (*Quercus*

<sup>3</sup> Čtverec 20 × 20 m byl v terénu vyměřen pásmem. Přesná poloha rohů čtverce však byla určena s přesností asi 1 m.

<sup>4</sup> Průměrný rozestup stromů [m] je počítán jako  $\sqrt{P/n}$ , kde  $P$  je plocha zájmového území (tedy vždy 400 m<sup>2</sup>) a  $n$  je počet stromů ve čtverci.

*robur*). Jihozápadní hrana čtverce je tvořena asi 3 m širokým a 15 m dlouhým pásem nízkého hustého porostu mladých dřevin, odhadem 6 m vysokých a s výčetní tloušťkou 5 cm. Jde o mix několika druhů dřevin, mimo jiné habru obecného (*Carpinus betulus*), lípy malolisté (*Tilia cordata*), hlohu obecného (*Crataegus laevigata*), jasanu ztepilého (*Fraxinus excelsior*), břízy bělokoré (*Betula pendula*). Celé zájmové území je ještě mimo tento hustý pás mladých dřevin poseto nízkými (asi 2 m) roztroušenými dřevinami, které tvoří 2. patro tohoto čtverce. Jedná se např. o hloh obecný (*Crataegus laevigata*), třešeň ptačí (*Cerasus avium*), jasan ztepilý (*Fraxinus excelsior*), buk lesní (*Fagus sylvatica*). V zájmovém území se vyskytuje asi 20 cm vysoký nepříliš hustý podrost ostružin. Vzrostlé jehličnany lze charakterizovat střední výškou 22-25 m a výčetní tloušťkou asi 45 cm. Vzrostlé listnáče jsou v průměru 16 m vysoké, výčetní tloušťka činí zhruba 20 cm. Rozestup dominantních stromů v tomto čtverci je 4 m.

### 3.2.2 Lokalita Sobotka

Jedná se o lokalitu v západní části Královéhradeckého kraje, která se rozkládá mezi obcemi Mladějov (na severu), Dolní Bousov (na západě), Staré Hradky, Bystřice a Vitiněves (na jihu) a Valdice a Železnice (na východě). Rozloha naskenovaného území je asi 160 km<sup>2</sup>. V území se nachází 67 obcí včetně Jičína, Sobotky, Ostružna, Markvartic, Zelenecké Lhoty, Jinolic a dalších. Oblast je celkem intenzivně zemědělsky využívána, orná půda pokrývá odhadem 50 %, lesy 30 %, travní plochy 10 % a sídla 10 % rozlohy území.

Nadmořská výška území se pohybuje od 270 m n. m. do 463 m n. m. Oblast je velice členitá obzvláště v lesních lokalitách, v zájmovém území se totiž nachází pískovcové skalní město Prachovské skály náležící do CHKO Český ráj. Lesní oblasti jsou charakteristické poměrně velkým sklonem, průměrně 10-15 %. Nezalesněná území mají sklon nižší, asi 3-8 %.

Skenování bylo prováděno z výšky cca 1 500 m nad střední výškou terénu a s hustotou skenování 1 bod/m<sup>2</sup>.

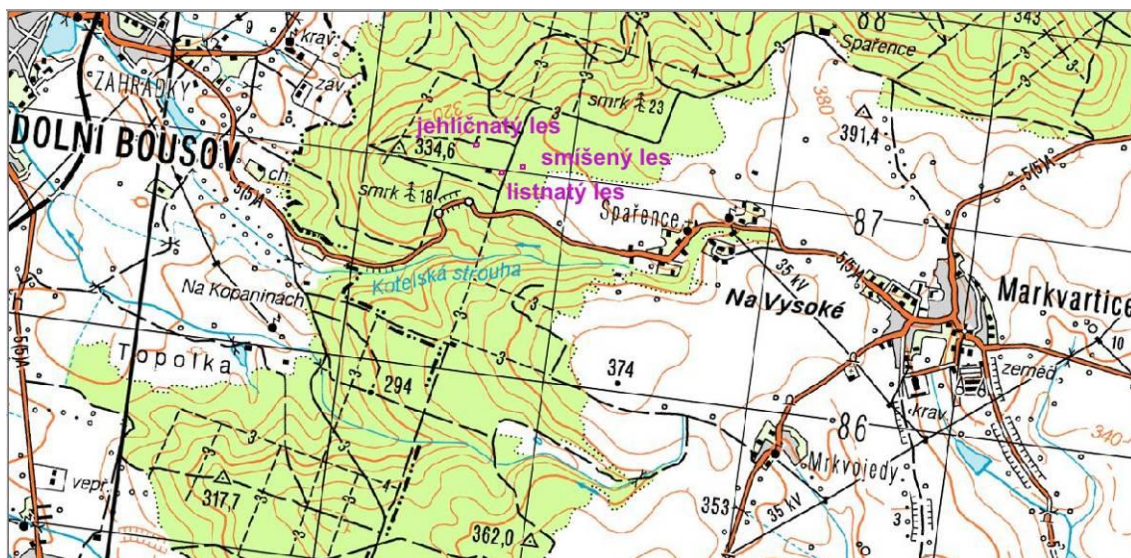
Vybraná 3 zájmová území se nacházejí v lese mezi obcemi Dolní Bousov a Markvartice, jak ukazuje obrázek (Obr. 10).

Při terénním průzkumu bylo ve čtverci **listnatého lesa** napočítáno 26 stromů, z toho 2 lípy malolisté (*Tilia cordata*), 1 buk lesní (*Fagus sylvatica*) a 23 dubů letních (*Quercus robur*). Zájmové území je bez podrostu a s průměrným rozestupem stromů asi 3,9 m. Střední výška stromů ve čtverci byla odhadnuta na 24 m a průměrná výčetní tloušťka kmene na 25-30 cm.

**Jehličnatý les** lze na základě terénního průzkumu charakterizovat jako heterogenní, s rozmanitým zastoupením jehličnatých dřevin, převažujícím druhem je modřín opadavý (*Larix decidua*). Bylo napočítáno 38 stromů, z toho 3 borovice lesní (*Pinus sylvestris*), 6 borovic vejmutovka (*Pinus strobus*), 7 smrků ztepilých (*Picea abies*), 3 vzrůstem nízké duby letní (*Quercus robur*) a 19 modřínů opadavých (*Larix decidua*).



Zájmové území je bez podrostu, s průměrnou výčetní tloušťkou kmene asi 30 cm, střední výškou stromů asi 25 m a průměrným rozstupem stromů 3,2 m.



**Obr. 10** Zájmová území v lokalitě Sobotka (zdroj: <http://geoportal.cenia.cz>)

Čtverec **smíšeného lesa** není přirozeným smíšeným lesem. Území je asi v polovině protnuto lesním průsekem ve směru západ-východ, na sever od cesty se nachází jehličnatý les, na jihu je listnatý les. Celkem bylo ve čtverci zjištěno 41 stromů. V jižní, listnaté, části to je 1 nízký (asi 2 m) smrk ztepilý (*Picea abies*), 5 dubů letních (*Quercus robur*) a 1 mohutný buk lesní (*Fagus sylvatica*). Střední výška dubů je asi 25 m, jejich průměrná výčetní tloušťka kmene asi 30-40 cm. Buk je vysoký zhruba 27 m a výčetní tloušťka činí 90 cm. Průměrný rozestup stromů v této jižní polovině je asi 5,3 m. V severní, jehličnaté, části se nachází 9 borovic lesních (*Pinus sylvestris*) a 25 smrků ztepilých (*Picea abies*). Střední výška jehličnatého porostu je asi 22 m, průměrná výčetní tloušťka 18 cm. Rozestup stromů činí v této části 2,4 m. Rozestup stromů v celém zájmovém území je pak 3,1 m. Zájmové území nemá žádný podrost.

### 3.3 Metodika zpracování dat

Data byla dodána v podobě mračna bodů ve formátu shp. Pro stanovení průchodnosti laserového paprsku korunami stromů a pro výpočet střední výšky stromů bylo nejprve nutné vytvořit digitální model reliéfu (DMR) a výškový model korun (CHM, canopy height model).

DMR byl tvořen manuálně z mračna bodů v software ArcGIS 9.3, v prostředí ArcMap a ArcScene. V zájmovém území byly vybrány body posledních odrazů, a to podmínkou, že TARGET = NUMTARGET. Tyto body byly zobrazeny v ArcScene, kde z nich byla funkcí 3D Analyst – Create/Modify TIN vytvořena na základě výškových údajů souřadnice Z nepravidelná trojúhelníková síť (TIN). Terénním průzkumem bylo zjištěno, že v žádném ze zájmových území se nenachází výrazné terénní tvary (např. kupy, jámy apod.), a tak byly z TINu manuálně

odstraněny všechny body, které se vyvyšovaly nad rovinu reliéfu. Tedy body, které sice byly posledními odrazy, ale zachycovaly např. nižší patra korun stromů, nízké větve, podrost.

CHM vznikl výběrem bodů prvních odrazů, podmínkou je, aby  $TARGET = 1$ . Manuálně byly odstraněny ty body, které byly zároveň body na reliéfu, aby tak vznikl opravdu pouze výškový model korun.

### 3.3.1 Průchodnost laserového paprsku korunami stromů

Průchodnost laserového paprsku korunami stromů lze charakterizovat jako procento vyslaných paprsků, které dosáhly reliéfu. Stanovuje se jako procento posledních odrazů, které jsou klasifikovány jako odrazy od reliéfu. Tedy podíl počtu bodů DMR a počtu bodů LR násobený 100.

Je zhodnocena průchodnost laserového paprsku skrze koruny v závislosti na druhu lesa (jehličnatý, listnatý, smíšený). Též je posouzena vhodnost zvolené bodové hustoty skenování a data pořízení pro tvorbu DMR.

### 3.3.2 Střední výška stromů v zájmových územích

Næsset (1997) ve své práci navrhuje několik způsobů, jak určit střední výšku porostu, ty pak mezi sebou porovnává a stanovuje míru podhodnocení (v metrech) oproti střední výšce zjištěné vlastním terénním šetřením, kterou jednotlivé metody přinášejí. Návrhy, jak určit střední výšku stromů z dat leteckého laserového skenování, jsou založeny na výpočtu:

- prostého aritmetického průměru všech výškových bodů CHM (canopy height model), výškového modelu korun,
- váženého průměru všech výškových bodů CHM, kde váhami jsou výčetní základny jednotlivých stromů, tedy plochy průřezů stromů ve výčetní výšce 1,3 m. Znamená to, že větší váhu mají ve výpočtu ty stromy, které jsou v průřezu plošněji, tedy zároveň i vyšší, protože mezi výčetní základnou stromu a jeho výškou platí silná korelace, jak uvádí Næsset (1997). Pokud nejsou známy výčetní základny stromů, které by musely být zjištěny terénním šetřením, navrhuje Næsset (1997) jako váhu použít individuální výšku stromu, čímž opět větší vliv na výpočet budou mít vyšší stromy.
- Způsobem, jak zvýšit váhu vysokých stromů, je vyloučit z výpočtu body nízkých výšek, které jsou sice prvními odrazy (FR), ale ve většině případů se jedná o odrazy z vnitřku korun, odrazy od nižších větví stromu, a tedy nereprezentují vrchol koruny. Třetí metodou výpočtu střední výšky stromů je dle Næsseta (1997) aritmetický průměr nejvyšších výškových hodnot.

V této práci jsou pro srovnání použity jednak všechny tři metody navrhované Næssetem (1997) – 1, 2, 5 a 6 (5 a 6 jsou modifikací Næssetova aritmetického průměru nejvyšších výškových hodnot), jednak další – 3 a 4, popsané níže:

1. Aritmetický průměr počítaný ze všech výškových hodnot CHM.

2. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou jednotlivé výšky stromů. Větší váhu ve výpočtu tak mají vyšší stromy.
3. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně. Nejnižší výšková hodnota má váhu 1. Výpočet je tak více ovlivňován vyššími stromy.
4. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami je zařazení hodnoty do intervalu 1-5. Body jsou v prostředí ArcMap klasifikovány do 5 výškových intervalů na základě klasifikační metody Natural Breaks (přirozené zlomy). Interval s nejnižšími hodnotami má váhu 1.
5. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 3 posledních (nejvyšších) intervalů 3, 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks. Hodnoty intervalů 1 a 2 s největší pravděpodobností nezachycují vrchol žádné koruny, jde převážně o odrazy z vnitřků korun a odrazy od podrostu. Od nejvyšších hodnot CHM se intervaly 1 a 2 liší ve výšce o 10-20 m. Od reliéfu jsou body 1. a 2. intervalu průměrně vzdáleny 1-10 m.
6. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 2 posledních (nejvyšších) intervalů 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks. Do výpočtu zasáhnou jen nejvyšší hodnoty, které jsou také s největší pravděpodobností odrazy od vrcholů korun, popř. nejvyšších partií korun.

Výpočty jsou nejprve prováděny s výškovými hodnotami Z (elipsoidická výška). Je získána střední elipsoidická výška korun v zájmovém území. Od ní je odečtena střední elipsoidická výška reliéfu, ta je aritmetickým průměrem výšek DMR daného zájmového území. Tímto rozdílem se dostane střední výška stromů (v metrech), která je porovnána s výsledky vlastního terénního šetření a s daty poskytnutými Ústavem pro hospodářskou úpravu lesů Brandýs nad Labem.

## 4. VÝSLEDKY

Hlavním cílem práce je zaprvé zhodnocení průchodnosti laserového paprsku lesním porostem na základě zpracování vzorků dat pořízených před začátkem vegetačního období, zadruhé porovnání metod užívaných ke stanovení střední výšky stromů a zatřetí posouzení, zda je zvolená hustota mračna bodů reálně využitelná pro získávání informací o lesních porostech.

### 4.1 Průchodnost laserového paprsku korunami stromů

Míra prostupnosti (průchodnost) laserového paprsku korunami stromů je vyjádřena procentem vyslaných paprsků, které dosáhly reliéfu. Počet vyslaných paprsků odpovídá počtu posledních odrazů, proto lze míru prostupnosti určit jako podíl počtu bodů na DMR a počtu bodů posledních odrazů násobený 100.

Data byla pořízena v mimovegetačním období, 24. 4. 2008. Tato doba je ideální pro sběr dat a následnou tvorbu digitálního modelu reliéfu, protože listnaté stromy jsou bez listů a laserový paprsek tak snáze proniká k reliéfu. Proto je v testovacích čtvercích listnatých lesů míra prostupnosti paprsku téměř stoprocentní, jak uvádí tabulka (Tab. 4). Jehličnaté lesy, které i přes nevegetační období mají jehlice, jsou dle předpokladu charakteristické mnohem nižší průchodností paprsku. Lesy smíšené tvoří střed mezi oběma extrémy, jejich míra prostupnosti se pohybuje, dle zjištěných výsledků, v průměru kolem 81,8 %.

*Tab. 4 Míra prostupnosti laserového paprsku lesním porostem (zdroj: autor)*

ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	Počet bodů posledních odrazů (LR)	Počet bodů na DMR	Míra prostupnosti [%]
Dobruška jehličnatý les	338	140	41,4 %
Sobotka jehličnatý les	209	145	69,4 %
Dobruška smíšený les	284	219	77,1 %
Sobotka smíšený les	386	334	86,5 %
Dobruška listnatý les	262	256	97,7 %
Sobotka listnatý les	237	237	100,0 %

Tato doba pořízení dat je vhodná pro následnou tvorbu DMR, méně vhodná už je pro vytváření výškových modelů korun, identifikování a vykreslování jednotlivých korun stromů a pro analýzy výšek stromů, kde je zapotřebí, aby paprsky vegetací nepronikaly a odrážely se pokud možno od vrcholů a vrchních partií stromů.

Porovnáme-li rozdíl v prostupnosti listnatými lesy, v Dobrušce bylo dosaženo 97,7 % a v Sobotce 100 %. Tento nepatrný rozdíl v zjištěných hodnotách je s největší pravděpodobností dán tím, že ve čtverci listnatého lesa na Dobrušsku se vyskytuje výraznější podrost, který na začátku vegetačního období již mohl být rostlý, a tudíž se o něj některé poslední odrazy zastavily.

V jehličnatých lesích byla zjištěna průchodnost paprsku 41,4 % v Dobrušce a 69,4 % v Sobotce. Zde je rozdíl výraznější a je dán rozdílnou hustotou porostu. Jehličnatý les v Dobrušce je podstatně hustší, s rozestupem stromů asi 2,5 m oproti jehličnatému lesu v Sobotce, kde jsou stromy v průměru 3,2 m vzdáleny.

Zhodnotíme-li výsledky průchodnosti ze zájmových území smíšených lesů, v Dobrušce byla dosažena míra prostupnosti 77,1 % a v Sobotce 86,5 %. Z dat lze vypočítat, že tato prostupnost je výrazně snížena, což je i vizuálně patrné na mračnu bodů, v místech výskytu jehličnanů. Naopak v místech výskytu listnatých stromů je téměř stoprocentní. Typicky je tento jev patrný zvláště v zájmovém území smíšeného lesa Sobotecka, které bylo zvoleno na rozhraní listnatého a jehličnatého lesa tak, že jehličnatá polovina lesa se vyskytuje v severní části čtverce a listnatá polovina v jižní části čtverce. V jižní polovině je prostupnost paprsku 98,4 %, v severní, jehličnaté, polovině dosahuje hodnoty 74,6 %. Průchodnost paprsku na Dobrušsku je snížena částečně i vlivem výskytu výrazného podrostu.

O průchodnosti laserového paprsku skrze koruny stromů nepřímo vypovídá i procentuální zastoupení bodů reliéfu v celkovém počtu odrazů získaných ze zájmového území. Údaje uvádí tabulka (Tab. 5).

*Tab. 5 Podíl bodů reprezentujících reliéf v zájmových územích (zdroj: autor)*

<b>ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ</b>	<b>Celkový počet odrazů</b>	<b>Počet odrazů od reliéfu</b>	<b>Procentuální vyjádření</b>
<b>Dobruška listnatý les</b>	661	256	<b>38,73 %</b>
<b>Dobruška smíšený les</b>	713	219	<b>30,72 %</b>
<b>Dobruška jehličnatý les</b>	792	140	<b>17,68 %</b>
<b>Sobotka listnatý les</b>	359	237	<b>66,02 %</b>
<b>Sobotka smíšený les</b>	631	334	<b>52,93 %</b>
<b>Sobotka jehličnatý les</b>	391	145	<b>37,08 %</b>

Porovnáme-li procentuální zastoupení bodů reliéfu v závislosti na druhu lesa, lze vyčíst z tabulky (Tab. 5), že největší podíl odrazů od reliéfu je zaznamenán v územích listnatého lesa, který je v době pořízení dat bez listí, tudíž laserový paprsek snáze projde až na reliéf. Dále je tato skutečnost dána faktem, že v neolistěných lesích se vyskytuje menší počet přirozených překážek, na kterých by mohlo dojít k odrazu, což souvisí s absencí listí. V územích jehličnatého lesa je podíl odrazů od reliéfu nejnižší, a to v případě lokality Dobruška i Sobotka, vyskytuje se zde více přirozených překážek v podobě větví a jehličí, na kterých dochází k odrazu dřívě, než laserový paprsek dosáhne reliéfu. Proto je v těchto jehličnatých zájmových územích větší zastoupení odrazů od vrcholů a vnitřků korun než od reliéfu.

## 4.2 Střední výška stromů

K určení střední výšky stromů bylo použito těchto 6 metod:

1. Aritmetický průměr počítaný ze všech výškových hodnot CHM ...  **$h_1$**
2. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou jednotlivé výšky stromů ...  **$h_2$**
3. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně ...  **$h_3$**
4. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou intervaly 1-5 podle klasifikace výšky metodou Natural Breaks ...  **$h_4$**
5. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 3 posledních (nejvyšších) intervalů 3, 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks ...  **$h_5$**
6. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 2 posledních (nejvyšších) intervalů 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks ...  **$h_6$**

Nejdříve byly vypočteny střední elipsoidické výšky stromů, od nich byla následně odečtena střední elipsoidická výška DMR, čímž se dostala střední výška stromů v zájmovém území. Výsledky jsou zpracovány v Tab. 6 (Dobruška) a v Tab. 7 (Sobotka).

Z tabulek Tab. 6 a Tab. 7 lze vysledovat trend (řadu), že střední výšky jsou nejnižší při použití výpočtu  **$h_1$** , vyšší při výpočtu  **$h_2$** , dále  **$h_4 - h_5 - h_3$**  a nejvyšší při výpočtu  **$h_6$** . Tato řada je porušena akorát v případě smíšeného lesa v lokalitě Sobotka, pro kterou platí  **$h_1 - h_2 - h_4 - h_3 - h_5 - h_6$** .

V listnatém lese (Dobruška) je střední výška stromů podle údajů hospodářské knihy Lesního hospodářského plánu 26 m. Střední výška odhadnutá na základě terénního průzkumu je asi 24 m. V tomto případě je nejvýstižnějším výpočtem střední výšky výpočet  **$h_6 = 24,61$  m**, popř. ještě  **$h_3 = 23,71$  m**.

Tab. 6 Porovnání šesti metod výpočtu střední výšky, Dobruška (zdroj: autor)

ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	střední elipsoid. výška DMR [m]	$h_1$ elip. [m]	$h_2$ elip. [m]	$h_3$ elip. [m]	$h_4$ elip. [m]	$h_5$ elip. [m]	$h_6$ elip. [m]
D listnatý	278,77	298,53	298,72	302,48	301,11	301,68	303,38
střední výška (dle HK: 26 m)		19,76 m	19,95 m	23,71 m	22,34 m	22,91 m	24,61 m
D jehličnatý	276,15	289,52	289,59	291,98	291,26	291,84	293,02
střední výška (dle HK: 23 m)		13,37 m	13,44 m	15,83 m	15,11 m	15,69 m	16,87 m
D smíšený	277,94	298,41	298,51	301,14	300,13	300,74	301,91
střední výška (dle HK: 27 m)		20,47 m	20,57 m	23,20 m	22,19 m	22,80 m	23,97 m

Poznámka: HK = hospodářská kniha Lesního hospodářského plánu

Tab. 7 Porovnání šesti metod výpočtu střední výšky, Sobotka (zdroj: autor)

ZÁJMOVÉ ÚZEMÍ	střední elipsoid. výška DMR [m]	$h_1$ elip. [m]	$h_2$ elip. [m]	$h_3$ elip. [m]	$h_4$ elip. [m]	$h_5$ elip. [m]	$h_6$ elip. [m]
S listnatý	343,73	362,27	362,37	365,48	364,47	365,10	366,35
střední výška (dle HK: 21 m)		18,54 m	18,64 m	21,75 m	20,74 m	21,37 m	22,62 m
S jehličnatý	343,30	371,49	371,52	373,11	372,29	372,46	373,51
střední výška (dle HK: 22 m)		28,19 m	28,22 m	29,81 m	28,99 m	29,16 m	30,21 m
S smíšený	345,95	365,26	365,38	368,94	368,05	370,75	371,46
střední výška (dle HK: 17 m)		19,31 m	19,43 m	22,99 m	22,10 m	24,80 m	25,51 m

Poznámka: HK = hospodářská kniha Lesního hospodářského plánu

V jehličnatém lese (Dobruška) je střední výška korun dle údajů hospodářské knihy 23 m. Terénním průzkumem bylo odhadnuto 20 m. Nejbližší vypočtenou střední výškou je  $h_6 = 16,87$  m.

Ve čtverci smíšeného lesa (Dobruška) udávají údaje hospodářské knihy střední výšku 27 m, terénním šetřením bylo odhadnuto 19 m. V tomto případě nelze stanovit, který výpočet střední výšky  $h_1 - h_6$  vyhovuje nejlépe.

V zájmovém území listnatého lesa (Sobotka) je střední výška podle hospodářské knihy 21 m, podle terénního průzkumu 24 m. Za shodné lze považovat výpočty středních výšek  $h_3 - h_6$ .

V jehličnatém lese (Sobotka) je střední výška stromů podle hospodářské knihy 22 m. Terénním šetřením se zjistilo 25 m. Nejbližším je v tomto případě výpočet  $h_1 = 28,19$  m. Lze říci, že v tomto zájmovém území data hospodářské knihy příliš neodpovídají skutečnosti a terénní šetření bylo výrazně podhodnoceno.

Ve smíšeném lese (Sobotka) udávají data hospodářské knihy střední výšku porostu 17 m. V terénu bylo odhadnuto 23 m. Za vyhovující lze považovat výpočty střední výšky stromů  $h_3 - h_5$  v rozmezích 22,10-24,80 m.

Je nutné poznamenat, že střední výšky v hospodářských knihách jsou počítány pro porost, což je základní jednotka prostorového rozdělení lesa, obvykle o rozloze 0,5-3 ha, představovaná relativně homogenním zastoupením dřevin. Jedná se tedy o mnohem větší oblast, než jakou je zájmové území vymežované v této práci, tedy čtverec  $20 \times 20$  m ( $400 \text{ m}^2$ ). Hodnoty středních výšek porostů tak nemusí nutně přesně charakterizovat střední výšky v zájmovém čtverci.

Ze zjištěných výpočtů lze usoudit, že výpočet aritmetického průměru ze všech výškových bodů CHM, tedy hodnotu  $h_1$ , není vhodné používat jako výpočet střední výšky stromů. I Næsset (1997) potvrzuje, že výpočet prostého aritmetického průměru vede k největšímu podhodnocení skutečné střední výšky stromů, konkrétně k podhodnocení o 4,1-5,5 m.

Jako vhodný se nezdá být ani způsob výpočtu pomocí váženého průměru, kde vahami jsou jednotlivé výšky stromů, tedy  $h_2$ . Næsset (1997) uvádí, že tato metoda výpočtu podhodnocuje skutečnou střední výšku stromů o 2,1-3,6 m.

Jako nejvýstižnější a relativně stejně výškově přesné se jeví výpočty  $h_3, h_4, h_5, h_6$ . Jak zmiňuje Næsset (1997), aritmetický průměr nejvyšších hodnot (metoda výpočtu  $h_5$  a  $h_6$ ) podhodnocuje skutečnou střední výšku max. o 1,9 m, místy i nadhodnocuje až o 0,4 m. Jako relativně vhodná se projevila i metoda výpočtu váženého průměru, kde váhou je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně,  $h_3$ , a výpočet váženého průměru, kde vahami jsou intervaly 1-5 podle klasifikace výšky metodou Natural Breaks ( $h_4$ ).

Závěrem je možné provést shrnutí, že užitá hustota skenování 1 bod/ $\text{m}^2$  v Sobotce a 1,2 bodu/ $\text{m}^2$  v Dobrušce je dostačující pro stanovení střední výšky stromů, je dostačující i pro vytvoření kvalitního a výstižného digitálního modelu reliéfu (zde je nutno dodržet i další podmínku, a to aby skenování probíhalo mimo vegetační období). Tato hustota skenování v kombinaci s datem pořizování před začátkem vegetačního období není vhodná ke kvalitnímu vykreslení korun a identifikaci jednotlivých stromů v zájmovém území. V datech pořízených s těmito parametry lze vyhledat a rozpoznat pouze stromy s mohutnými korunami. Lépe identifikovatelné jsou jehličnaté než listnaté stromy.



## 5. DISKUZE

Jedním ze záměrů práce bylo zhodnotit průchodnost laserového paprsku lesním porostem na datech LLS pořízených před začátkem vegetačního období. Data byla získána při leteckém laserovém skenování v testovacích lokalitách Sobotka a Dobruška 24. 4. 2008. V literatuře se uvádí (Kraus a Pfeifer, 1998), že mezní hodnota průchodnosti paprsku vegetací až na reliéf je 25 %. Při nižší míře prostupnosti již není možné vytvořit kvalitní a výškově přesný digitální model reliéfu, který by dostatečně vystihoval průběh terénu v daném území.

O prostupnosti laserového paprsku korunami stromů bylo zatím napsáno málo. Dosud nevznikla žádná analýza, žádný vědecký článek řešící tuto problematiku. Veškeré poznatky o průchodnosti paprsku lesním porostem jsou pouze okrajově zmíněny v článcích týkajících se tvorby DMR (např. Kraus a Pfeifer, 1998), rozsáhlejší popis pak vznikl v článku Hirata et al. (2009), kde je řešena vzájemná korelace mezi prostupností paprsku a stupněm prořezávky provedené na území zájmové oblasti.

Syntézou poznatků z ostatní literatury lze dospět k závěru, že míra prostupnosti laserového paprsku lesní vegetací je ovlivňována především hustotou porostu (Hirata et al., 2009). V homogenním porostu, kde bylo vykáceno v jednom zájmovém území 38 % výčetní základny porostu, v druhém zájmovém území 30,4 % výčetní základny porostu a ve třetím zájmovém území se prořezávka neprováděla, se podle výpočtů Hirata et al. (2009) měnila průchodnost laserového paprsku z 95,3 % v prvním území, na 89,2 % v druhém území a 60 % v třetím, porostem nejhustším, území. Stejných výsledků bylo dosaženo i v rámci této práce, kde je průchodnost laserového paprsku různě hustým porostem stanovena na příkladu zájmového území jehličnatého lesa v lokalitě Dobruška a jehličnatého lesa v lokalitě Sobotka. Ve čtverci  $20 \times 20$  m na Dobrušsku bylo terénním šetřením spočítáno 66 stromů s průměrným rozestupem 2,5 m. Jedná se tedy o mírný hustník. Ve čtverci  $20 \times 20$  m na Sobotecku bylo zjištěno 38 jehličnanů s průměrným rozestupem 3,2. Jde o čistý, rostlý les. Prostupnost paprsku v řidším lese (Sobotka) činí 69,4 %, oproti hustšímu lesu (Dobruška) 41,4 %.

Vliv na prostupnost paprsku vegetací má též doba sběru dat, což zmiňuje např. Hyypä et al. (2005) v souvislosti s tvorbou vyhovujících DMR. Zpracovávaná data byla pořízena před začátkem vegetační doby a jsou charakteristická relativně vysokou prostupností. Obzvláště v oblastech listnatých lesů, kde bylo dosaženo prostupnosti 100 % (listnatý les Sobotka).

Pro srovnání by bylo zajímavé porovnat data ze stejných území pořízená ve vegetačním období. Tato data ale nebyla k dispozici.

Dále je prostupnost laserového paprsku korunami stromů ovlivněna druhem lesa. Velký rozdíl bude v případě dat pořízených v době vegetačního klidu a dat naskenovaných ve vegetačním období. Na toto konkrétní téma nebyla v literatuře zpracována žádná odborná analýza, lze tak pouze činit závěry na základě poznatků z ostatní literatury. Při skenování lesních porostů ve vegetačním období se dá předpokládat, že prostupnost paprsku bude výrazně snížena oproti skenování v době vegetačního klidu. To je dáno faktem, že více se paprsků se v této době bude odrážet od vegetačního krytu a méně jich projde až k reliéfu. Rozdíly v prostupnosti listnatými lesy a jehličnatými lesy nebudou příliš velké a stanovení, zda se jedná o les listnatý nebo jehličnatý bude ztíženo.

Data použitá pro tuto bakalářskou práci byla ale pořízena mimo vegetační období, na nich je zhodnocení, zda se jedná o les listnatý, jehličnatý nebo smíšený, výrazně snazší. Předpoklad, že průchodnost paprsku jehličnatým porostem, který má po celý rok jehlice (s výjimkou modřinu opadavého), je nižší než průchodnost listnatým porostem, byl potvrzen. Z výsledků je patrné, že prostupnost paprsku listnatým lesem je 97,7 % v případě Dobrušky a 100 % v případě Sobotky, v jehličnatých porostech bylo zjištěno 41,4 % v případě Dobrušky a 69,4 % v případě Sobotky. Výsledky šetření ve smíšeném lese ukázaly, že procento prostupnosti se pohybuje mezi hodnotami listnatého a jehličnatého lesa. Prostupnost je výrazně snížena v místě výskytu jehličnatých stromů, naopak téměř stoprocentní v místech listnatých dřevin. V lokalitě Dobruška byla vypočtena prostupnost 77,1 % a v lokalitě Sobotka 86,5 %.

Průchodnost paprsku závisí také na množství podrostu, který ale v zájmových územích nebyl nijak výrazný a rozrostlý vzhledem k datu pořízení mračna bodů. Opět by bylo zajímavé srovnání výsledků s daty z vegetačního období, kde by podrost měl jistě větší vliv.

Ve všech testovacích územích byla prostupnost paprsku vyšší než 25 %, což na základě poznatků Krause a Pfeifera (1998) znamená, že zvolená hustota skenování 1-1,2 bodu/m<sup>2</sup> je vhodná pro tvorbu digitálního modelu reliéfu v zájmových územích.

Pro případné zvýšení průchodnosti laserového paprsku lesním porostem je nutné zvýšit hustotu skenování (a to buď snížením výšky letu nebo zvýšením PRF nebo snížením rychlosti letu) nebo zmenšit průměr procházejícího paprsku, který závisí na divergenci paprsku i na výšce skenování (Aldred a Bonnor, 1985), (Næsset, 2004).

Dalším záměrem práce bylo porovnat metody pro výpočet střední výšky stromů v zájmových územích. Bylo stanoveno 6 metod výpočtu:

1. Aritmetický průměr počítaný ze všech výškových hodnot CHM.
2. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou jednotlivé výšky stromů.
3. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně.

4. Vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou intervaly 1-5 podle klasifikace výšky metodou Natural Breaks.
5. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 3 posledních (nejvyšších) intervalů 3, 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks.
6. Aritmetický průměr nejvyšších bodů CHM počítaný ze všech hodnot 2 posledních (nejvyšších) intervalů 4 a 5 dle klasifikace na základě Natural Breaks.

Metody 1, 2, 5 a 6 vycházejí z návrhů výpočtu středních výšek v článku Næsseta (1997). Metody 3 a 4 jsou navrženy autorem. Zjištěné výšky byly porovnány s daty hospodářských knih Lesních hospodářských plánů a s vlastním terénním šetřením.

Nutno však poznamenat, že střední výšky uváděné v hospodářských knihách jsou vztaženy k celým porostům, tedy územím o rozloze 0,5-3 ha. Nemusí tedy přesně vystihovat střední výšku zájmového území. Za údaje vhodné k porovnání lze považovat střední výšky takových porostů, které jsou tvořeny jedinou monokulturou přibližně stejně vzrostlých stromů. Takové podmínky vyhovují 3 zkoumaná zájmová území: listnatý les Dobruška (tvořen monokulturou dubů), jehličnatý les Dobruška (tvořen monokulturou smrků) a listnatý les Sobotka (tvořen monokulturou dubů), vždy charakteristické relativně stejně vysokými stromy.

Terénním šetřením byly střední výšky stromů subjektivně odhadnuty. Odhad byl ale ztížen v případě nestejné výšky stromů v území a dále v případě výskytu více pater ve čtverci (např. smíšený les Dobruška). Pro plnohodnotné stanovení střední výšky v území by bylo nutné určit přesně výšku všech stromů ve čtverci (např. hypsometrem, tachymetrem) a na základě tohoto přesného terénního šetření pak porovnat, která z užitých metod výpočtu je nejvhodnější. Terénní šetření je i dle literatury (Nelson et al., 1988) doporučované pro objektivnější zhodnocení užitých metod výpočtu střední výšky.

Závěry o vhodném stanovení střední výšky jsou tedy provedeny na základě dat hospodářských knih (HK) a na základě provedených šesti způsobů výpočtu ve 3 vyhovujících lokalitách: listnatý les Dobruška, jehličnatý les Dobruška a listnatý les Sobotka. V prvním případě (Dobruška listnatý) se údaji z HK 26 m nejvíce přibližuje hodnota  $h_6 = 24,61$  m. V případě jehličnatého lesa, Dobruška, se střední výšce dle HK 23 m nejvíce blíží  $h_6 = 16,87$  m. A v území listnatého lesa v Sobotce uvádí HK střední výšku 21 m, čemuž se blíží výsledky  $h_3 = 21,75$  m,  $h_4 = 20,74$  m a  $h_5 = 21,37$  m.

Z výsledků práce i ze závěrů Næsseta (1997) vyplývá, že metoda výpočtu aritmetického průměru ze všech výškových hodnot CHM nejvíce podhodnocuje skutečnou střední výšku stromů. Næsset (1997) uvádí podhodnocení v rozmezí 4,1-5,5 m, výsledky práce ukazují podhodnocení o 2,5-9,6 m.

Jako nevhodná a podhodnocující se ukázala také metoda výpočtu váženého průměru, kde vahami jsou jednotlivé výšky stromů. Næsset (1997) určil podhodnocení touto metodou na 2,1-3,6 m. V této práci bylo zjištěno 2,4-9,5 m.

Jako vhodné se na základě srovnání jeví metody výpočtu střední výšky stromů 3, 4, 5 a 6, popsané výše. Z nich nejlepších výsledků dosáhly způsoby výpočtu aritmetického průměru nejvyšších hodnot CHM (metoda 5 a 6 popsaná výše), pro něž Næsset (1997) uvádí podhodnocení o 1,9 m až nadhodnocení o 0,4 m. V rámci této práce bylo dosaženo podhodnocení o 7,3 m až nadhodnocení o 1,6 m.

U metody výpočtu střední výšky aritmetickým průměrem nejvyšších hodnot je ale nutné si uvědomit, že do výpočtu nevstupují hodnoty nejnižších odrazů, které lze interpretovat jako odrazy z vnitřků korun, popř. jako odrazy od podrostu. Je však na druhou stranu možné, že se může jednat i o odrazy od stromů tvořících druhé patro porostu, a tím pádem by tak jejich výška do výsledného výpočtu nezasáhla. Toto je nutné ošetřit na základě terénního šetření a v případě, že se v zájmovém území vyskytuje druhé porostní patro, je doporučováno pro výpočet zvolit spíše metodu 3 - vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně nebo metodu 4 - vážený průměr výškových hodnot CHM, kde vahami jsou intervaly 1-5 podle klasifikace výšky metodou Natural Breaks.

Opět nutno podotknout, že by pro srovnání bylo vhodné zanalyzovat i data pořízená v době vegetačního růstu, které by bylo charakteristické větším zastoupením odrazů od vrcholů korun.

Pro určování střední výšky stromů nejsou data pořízená před začátkem vegetačního období příliš vhodná, výrazně totiž podhodnocují skutečnou výšku stromů. Doporučuje se výšku stromů určovat z dat, kdy jsou stromy plně olistěny (Lefsky et al., 2002).

Fenomén podhodnocování výšky stromů, který popisuje např. Maltamo et al. (2004, in Shan a Toth, 2009) a Yu et al. (2004a), byl potvrzen i výsledky této práce.

## 6. ZÁVĚR

Jedním z cílů této práce bylo zhodnotit průchodnost laserového paprsku lesním porostem. Ukázalo se, že na datech pořízených v době vegetačního klidu (24. 4. 2008) lze snadno díky rozdílným hodnotám prostupnosti paprsku vegetací určit, jedná-li se o jehličnatý, listnatý či smíšený les. Listnatý les je v tomto období charakteristický téměř stoprocentní průchodností paprsku.

Dalším závěrem práce je poznatek, že pro stanovení střední výšky stromů v zájmovém území je vhodné použít metodu aritmetického průměru výškových bodů CHM počítaný z hodnot 2 posledních (nejvyšších) intervalů 4 a 5 dle klasifikace bodů na základě Natural Breaks do pěti intervalů, popř. tento samý aritmetický průměr počítaný pro 3 nejvyšší intervaly, a to za předpokladu, že se jedná o výškově homogenní porost. Pokud je porost výškově heterogenní a vyskytuje se v něm i druhé porostní patro, je vhodné použít metodu výpočtu váženého průměru výškových hodnot CHM, kde váhou je pořadí výšek stromů seřazených vzestupně, nebo výpočet váženého průměru výškových hodnot CHM, kde vahami jsou intervaly 1-5 podle klasifikace výšky metodou Natural Breaks.

Je možné nalézt shodu s literaturou v tom, že z dat leteckého laserového skenování je získána podhodnocená výška stromů.

Užitá hustota skenování 1-1,2 bodu/m<sup>2</sup> v lokalitách Dobruška a Sobotka se v kombinaci s datem pořízení ukázala jako dostačující pro tvorbu digitálního modelu reliéfu.

Budoucnost této technologie spočívá v automatizování filtračních a klasifikačních procesů a převážně ve zdokonalování filtračních metod užívaných při získávání digitálních modelů reliéfu. Kvalitních a výškově přesných DMR může být dosaženo současným užíváním několika filtračních metod v jednom území, lineární predikce a vysokofrekvenční filtry ve svažitých partiích, díky nimž budou zachovány jemné detaily a hrany v kontuře terénu, a nízkofrekvenční filtry v rovinatých partiích, které zajistí vyhlazení terénu. Výškově přesný DMR je základem pro kvalitní inventarizaci lesů, konkrétně pro exaktní určení výšky stromů.

Letecké laserové skenování je vhodnou technologií pro zjišťování a zpřesňování charakteristik lesních porostů.

## SEZNAM ZDROJŮ A INFORMACÍ

- AHOKAS, E., YU, X., OKSANEN, J., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, H. (2005): Optimization of the scanning angle for countrywide laser scanning. Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning 2005, Enschede, The Netherlands, September 12-14, 2005. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume 36, Part 3/W19, s. 115-119.
- ALDRED, A. H., BONNOR, G. M. (1985): Application of airborne lasers to forest surveys. Information Report PI-X-51, Canadian Forestry Service, Petawawa National Forestry Institute, 62 s.
- BALTSAVIAS, E. P. (1999): Airborne laser scanning: Basic relations and formulas. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, Volume 54, Issue 2-3, s. 199-214.
- BRANDTBERG, T., WARNER, T. A., LANDENBERGER, R. E., MCGRAW, J. B. (2003): Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. Remote Sensing of Environment, Volume 85, Issue 3, s. 290-303.
- BRÁZDIL, K. (2009): Projekt tvorby nového výškopisu území České republiky. GIS Ostrava 2010, 24.-27. 1. 2010, Ostrava, 7 s. Dostupné jako soubor PDF z WWW: <[http://gis.vsb.cz/GIS\\_Ostrava/GIS\\_Ova\\_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ\\_5\\_2.pdf](http://gis.vsb.cz/GIS_Ostrava/GIS_Ova_2010/sbornik/Lists/Papers/CZ_5_2.pdf)>
- DOBROVOLNÝ, P. (2004): Spektrální chování objektů. [elektronický zdroj]. Brno, Masarykova univerzita, 2004. Výukové materiály k předmětu. Dostupné jako soubor PDF také z WWW: <[http://www.geogr.muni.cz/archiv/vyuka/DPZ\\_CVICENI/Texty/DPZ\\_03\\_spektralni\\_chovani.pdf](http://www.geogr.muni.cz/archiv/vyuka/DPZ_CVICENI/Texty/DPZ_03_spektralni_chovani.pdf)>.
- DOLANSKÝ, T. (2004): Lidary a letecké laserové skenování. Universita J. E. Purkyně, Ústí nad Labem, 100 s.
- GOODWIN, N. R., COOPS, N. C., CULVENOR, D. S. (2006): Assessment of forest structure with airborne LiDAR and the effects of platform altitude. Remote Sensing of Environment, Volume 103, Issue 2, s. 140-152.
- HIRATA, Y., FURUYA, N., SUZUKI, M., YAMAMOTO, M. (2009): Airborne laser scanning in forest management: Individual tree identification and laser pulse penetration in a stand

- with different levels of thinning. *Forest Ecology and Management*, Volume 258, Issue 5, s. 752-760.
- HOLMGREN, J., PERSSON, Å. (2004): Identifying species of individual trees using airborne laser scanner. *Remote Sensing of Environment*, Volume 90, Issue 4, s. 415-423.
- HÖHLE, J., POTŮČKOVÁ, M. (2010): Assessment of the quality of digital terrain models : Introduction book to the e-learning course [CD-ROM]. EuroSDR, Aalborg University, Univerzita Karlova v Praze, 2010, 54 s.
- HUGERSHOFF, R. (1939): Die Bildmessung unde ihre frostlichen Anwendungen. *Der Deutsche Forstwirt*, Band 50, Folge 21, s. 612-615.
- HYYPÄ, H., YU, X., HYYPÄ, J., KAARTINEN, H., HONKAVAARA, E., RÖNNHOLM, P. (2005): Factors affecting the quality of DTM generation in forested areas. *Proceedings of the ISPRS Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, The Netherlands, September 12-14, 2005. In: *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 36, Part 3/W19, s. 85-90.
- HYYPÄ, J., SCHARDT, M., HAGGRÉN, H., KOCH, B., LOHR, U., PAANANEN, R., SCHERRER, H. U., LUUKKONEN, H., ZIEGLER, M., HYYPÄ, H., PYYSALO, U., FRIEDLÄNDER, H., UUTTERA, J., WAGNER, S., INKINEN, M., WIMMER, A., KUKKO, A., AHOKAS, E., KARJALAINEN, M. (2001): High-Scan: The first European-wide attempt to derive single-tree information from laserscanner data. *The Photogrammetric Journal of Finland*, Volume 17, Issue 2, s. 58-68.
- KAARTINEN, H., HYYPÄ, J. (2008): Tree Extraction - report of EuroSDR project. Frankfurt am Main, 60 s.
- KAŠPAR, M., POSPÍŠIL, J., ŠTRONER, M., KŘEMEN, T., TEJKAL, M. (2003): Laserové skenovací systémy ve stavebnictví. Vega, Hradec Králové, 111 s.
- KOLÁŘ, J., HALOUNOVÁ, L., PAVELKA, K. (1997): Dálkový průzkum Země 10. ČVUT, Praha, 164 s.
- KRAUS, K. (2007): *Photogrammetry: Geometry from images and laser scans*. 2. vydání. Walter de Gruyter, Berlin, 441 s.
- KRAUS, K., PFEIFER, N. (1998): Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 53, Issue 4, s. 193-203.
- LEFSKY, M., COHEN, W., PARKER, G., HARDING, D. (2002): Lidar remote sensing for ecosystem studies. *BioScience*, Volume 52, Issue 1, s. 19-30.
- Mezi stromy : Lesnicko-dřevařský vzdělávací portál* [online]. 200? [cit. 2010-08-02]. Slovníček pojmů. Dostupné z WWW: <<http://www.mezistromy.cz/cz/slovnicek-pojmu>>.

- NÆSSET, E. (1997): Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 52, Issue 2, s. 49-56.
- NÆSSET, E. (2004): Effects of different flying altitudes on biophysical stand properties estimated from canopy height and density measured with a small-footprint airborne scanning laser. *Remote Sensing of Environment*, Volume 91, Issue 2, s. 243-255.
- NELSON, R., KRABILL, W., MACLEAN, G. (1984): Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 15, Issue 3, s. 201-212.
- NELSON, R., KRABILL, W., TONELLI, J., (1988): Estimating forest biomass and volume using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment*, Volume 24, Issue 2, s. 247-267.
- NILSSON, M. (1996): Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment*, Volume 56, Issue 1, s. 1-7.
- PÄIVINEN, R., NOUSIAINEN, M., KORHONEN, K. (1992): Puutunnusten mittaamisen luotettavuus. English summary: Accuracy of certain tree measurements. *Folia Forestalia* 787, 18 s. (in Finnish with English summary).
- PERSSON, Å., HOLMGREN, J., SÖDERMAN, U. (2002): Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Volume 68, Issue 9, s. 925-932.
- Riegl USA : Technical Specification for the Riegl LMS-Q560* [online]. c2008-2009 [cit. 2010-08-10]. LMS-Q560. Dostupné z WWW: <<http://www.rieglusa.com/products/airborne/bp560/technical.shtml>>.
- SHAN, J., TOTH C. K. (ed.) (2009): *Topographic Laser Ranging and Scanning: Principles and Processing*. Taylor & Francis Group, 590 s.
- SCHREIER, H., LOUGHEED, J., TUCKER, C., LECKIE, D. (1985): Automated measurements of terrain reflection and height variations using airborne infrared laser system. *International Journal of Remote Sensing*, Volume 6, Issue 1, s. 101-113.
- Slovník VÚGTK : terminologický slovník zeměměřictví a katastru nemovitostí* [online]. c2005-2010 [cit. 2010-08-05]. Dostupné z WWW: <<http://www.vugtk.cz/slovník/>>.
- ŠTRONER, M., POSPÍŠIL, J. (2008): *Terestrické skenovací systémy*. ČVUT, Praha, 185 s.
- ŠŤASTNÝ, F. (1997): *Zpracování experimentálních dat*.  
[http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/frst\\_zed.pdf](http://amper.ped.muni.cz/jenik/nejistoty/frst_zed.pdf)
- WEHR, A., LOHR, U. (1999): Airborne laser scanning - an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 54, Issue 2-3, s. 68-82.
- YU, X., HYYPPÄ, J., KAARTINEN, H., MALTAMO, M. (2004a): Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment*, Volume 90, Issue 4, s. 451-462.



YU, X., HYYPPÄ, J., HYYPPÄ, H., MALTAMO, M. (2004b): Effects of flight altitude on tree height estimation using airborne laser scanning. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume 36, Part 8/W2, s. 96-101.